



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA EKONOMIKY, MANAŽERSTVÍ A HUMANITNÍCH VĚD

Spolehlivost prokovů u desek plošných spojů při pájení přetavením

Reliability of vias in printed circuit boards during soldering reflow

Bakalářská práce

Studijní obor: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Autor práce: Dominik Baudyš

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

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Baudyš** Jméno: **Domínik** Osobní číslo: **456972**
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:

Spolehlivost prokových u desek plošných spojů při pájení přetavením

Název bakalářské práce anglicky:

Reliability of vias in printed circuit boards during soldering reflow

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se deskami plošných spojů včetně prokových a používaných materiálů u technologie povrchové montáže.
- 2) Připravte si vzorky, které otestujete s ohledem na jejich spolehlivost z pohledu prokových a teplotního profilu.
- 3) Výsledky vyhodnoťte a proveďte ekonomickou analýzu procesu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice 2005, ISBN 80-903597-0-1
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [3] URBÁNEK J., KLABAČKA E.: Technologie elektronických zařízení, ČVUT Praha, 1997
- [4] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university 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: **25.05.2018**

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

.....

Dominik Baudyš

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing Karlu Duškovi, Ph.D. za jeho cenné rady, věcné připomínky a jeho drahocenný čas, který mi věnoval během konzultací a při práci v laboratořích.

Anotace:

Cílem této bakalářské práce je přiblížit čtenářům desky plošných spojů společně s chybami, které se na deskách mohou objevit. V teoretické části bude uveden popis desky, metody, jakými se desky vyrábí a chyby, jež mohou nastat. V praktické (experimentální) části je popsáno pracoviště, na kterém byla zkoumána spolehlivost prokovů a zhodnocení naměřených hodnot. Ekonomická část obsahuje porovnání, zda je výhodnější součástky z desky při prasknutí prokovu odpájet a znovu použít nebo koupit součástky nové.

Klíčová slova:

Deska plošných spojů, prokov, pájení přetavením, chyby při pájení

Abstract:

The goal of this bachelor thesis is to introduce the printed circuit boards to the reader together with the defects that can appear within these boards. In the theoretical part, there will be the subscription of printed circuit boards, methods of production and possible defects. In the practical part, there is a subscription of the working place on which was the reliability of repetitive heating of vias and the evaluation of the measured data researched. The Economical part includes a comparison of different ways of reparation of defected printed circuit boards.

Key words:

Printed circuit board, vias, reflow soldering, defects on printed circuit board

Obsah

1. Úvod	9
2. Plošné spoje.....	10
2.1 Dělení desek plošných spojů	10
2.2 Funkce desky plošných spojů	11
2.3 Části desky plošných spojů	11
2.3.1 Jádro	12
2.3.2 Cu folie.....	12
2.3.3. Pre preg	12
2.4 Výhody.....	13
2.5 Nevýhody.....	13
3. Technologie výroby	13
3.1 Subtraktivní metoda.....	13
3.2 Aditivní metoda	14
3.3 Výroba prokovů	15
4. Pájení přetavením	15
4.1 Pájecí pasta.....	16
4.2 Osazení součástek	16
4.3 Přetavení pasty.....	17
5. Chyby při pájení přetavením	18
5.1 Nesmáčivost	18
5.2 Odsmaččení.....	18
5.3 Prohnutí pouzdra.....	19
5.4 Trhliny.....	19
5.5 Kuličky pájky	19
5.6 Tombstoning.....	20
5.7 Voidy.....	20
5.8 Whiskery.....	21
6. Pouzdra pro technologii SMT	22
6.1 Pouzdro typu MELF.....	22
6.2 Pouzdro typu flat chip	23
6.3 Pouzdro typu SMA.....	23
6.4 Pouzdra SOP a jejich modifikace	23
6.5 Pouzdra FP a jejich modifikace	24
6.6 Pouzdra typu PLCC.....	24

6.7 Pouzdra typu BGA.....	24
7. Praktická část.....	25
7.1 Popis použitých zařízení	25
7.2 Změřené hodnoty.....	27
7.3 Zhodnocení praktické části.....	30
8. Ekonomická část.....	31
8.1 Příklady výpočtů	32
8.2 Tabulka pro porovnání dob potřebných k odpájení a očištění.....	33
8.3 Tabulka pro porovnání a vypočtení nákladů	33
8.4. Tabulka pro vyhodnocení způsobu.....	33
8.5 Vyhodnocení ekonomické části.....	34
9. Závěr	35
10. Zdroje.....	36
11. Seznam obrázků	38

Seznam použitých zkratk

DPS – deska plošného spoje

Cu folie – měděná folie

FR4 – flame retardant

CNC – počítačem řízený obráběcí stroj

SnBi – cín bizmutová pájka

BGA – ball grid array, pouzdro pro SMT

SMD – surface mount devices, součástky pro povrchovou montáž

SMT – surface mount technology, technologie povrchové montáže

THT – through hole technology

MELF – metal electric face, pouzdro pro SMT

SOP – small outline packages, pouzdro pro SMT

SOT – small outline transistor, pouzdro pro SMT

SOD – small outline diode, pouzdro pro SMT

MSOP – micro small outline package, pouzdro pro SMT

FP – flat package, pouzdro pro SMT

QFP – quad flat package, pouzdro pro SMT

PLCC – plastic leaded chip carrier, pouzdro pro SMT

1. Úvod

Technický průmysl se rozvíjí neuvěřitelnou rychlostí a snaží se člověku co nejvíce ulehčit práci. Vzniká tak mnoho rozličných zařízení se širokou paletou používaných součástek a přístrojů. Jednu věc však mají společnou. Touto věcí je potřeba spojit dané komponenty tak, aby vznikl elektrický obvod. Propojení mohou být provedena mnoha způsoby. Často používanou metodou je však pájení.

Pájení, jako každý obor, prochází neustálými změnami. Tou nejvýraznější je snaha omezovat pájky obsahující olovo z důvodu zlepšení ekologie. Musely tedy vzniknout bezolovnaté pájky, jejichž vlastnosti jsou mnohdy horší než pájky olovnaté.

Bezolovnaté pájky se často přetavují při výrazně vyšší teplotě. Tato skutečnost má neblahý vliv na některé komponenty. Díky vyššímu ohřevu se může projevit vliv teplotní roztažnosti. Jako příklad si můžeme uvést prokov na desce plošných spojů. Ten byl konstruován pro nižší teploty. Proto se někdy stane, že při vysoké teplotě praskne a elektrický obvod se rozpojí.

V této práci budu popisovat vliv různých teplotních profilů při pájení přetavením na prokovy na desce plošných spojů. Přiblížím také různé druhy pájení, používané materiály, desky plošných spojů i tvorbu prokovů a jejich chyby. V praktické části budu jednotlivé vzorky několikrát ohřívat, následně vyhodnocovat jejich vlastnosti.

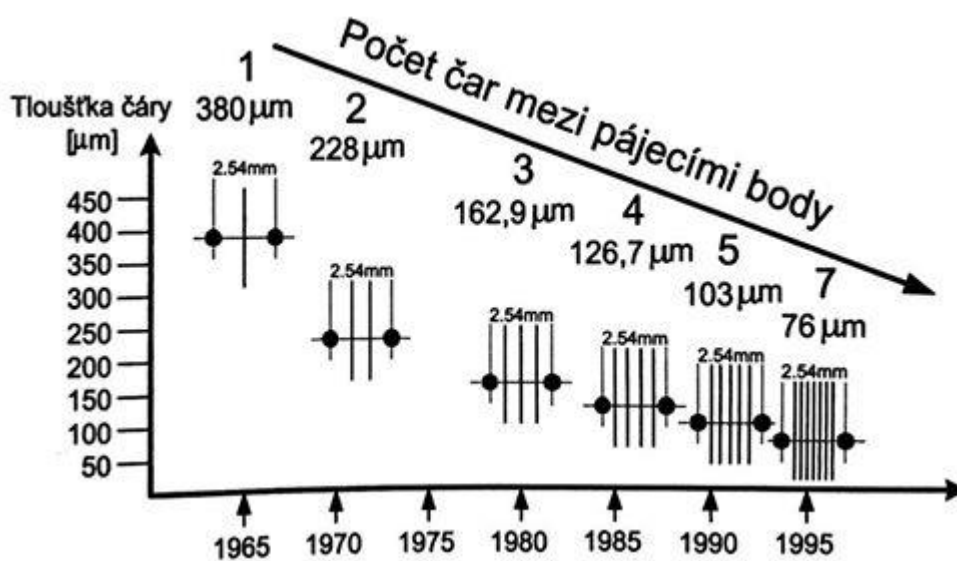
V ekonomické části se pokusím ekonomicky zhodnotit, zda se v případě prasknutí prokovu vyplatí komponenty z desky plošných spojů odebrat, vyčistit a znovu použít nebo je ekonomičtější zakoupit součástky nové.

2. Plošné spoje

Během druhé světové války vynalezli vědci něco, čemu dnes říkáme plošný spoj. Zřejmě ani netušili, jaký přínos jejich dílo bude mít. Dodnes jsou totiž plošné spoje velmi důležitou částí moderní elektroniky.

Nejprve vznikly desky jednovrstvé, ty byly ale velice rychle nahrazeny deskami dvouvrstvémi z důvodu velkého počtu součástek a narůstající hustoty spojů. Toto nahrazení sebou ale neslo jedno úskalí. Bylo potřeba vodivě propojit obě strany. Z počátku se toto spojení realizovalo pomocí různých nýtků a drátků. Nebylo však příliš vyhovující, a tak se přešlo na pokovené otvory, které měly jak funkci vodivého propojení stran, tak i uchycení vývodů součástek.

Již brzy však ani tato technologie nesplňovala nároky nových obvodů a musely být přidány další vrstvy. Postupné narůstání počtu vrstev zastavil až nástup integrovaných obvodů. V té době se zdálo, že dvě vrstvy budou opět stačit. Nyní ale můžeme být svědky zvyšování počtu vrstev z důvodu miniaturizace, snižování cen, navyšování výkonů a zvyšování spolehlivosti. [1]



Obr.1 Vývoj hustoty plošných spojů [1]

2.1 Dělení desek plošných spojů

Desky plošných spojů lze rozdělit podle počtu vrstev na:

1) Jednovrstvé

Jádro, které má na jedné straně vytvořený určitým způsobem vodivý profil pomocí měděné folie.

2) Dvouvrstvé

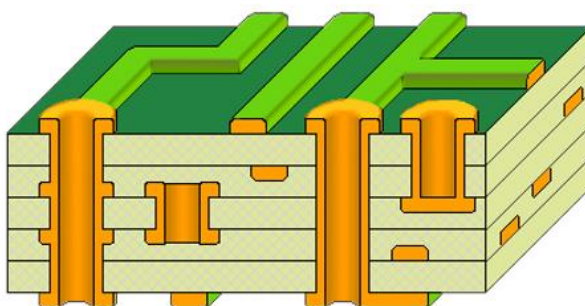
Jádro, které má na obou stranách vytvořen vodivý profil pomocí měděné folie.

3) Vícevrstvé

Na jádro se postupně vrství skelné tkaniny s pryskyřicí (pre pregy) a měděné folie.

Vzniká tak několik vodivých vrstev. [1] [4]

V případě dvou a vícevrstevých desek je potřeba jednotlivé vrstvy v určitých místech vodivě propojit. K tomu slouží propoje (tzv. vias). Propojům se budu podrobněji věnovat v kapitole Výroba prokovů. Na následujícím obrázku lze vidět, že prokov může spojovat všechny nebo jen některé vrstvy. [4]



Obr. 2 Znárodnění prokovů na DPS [4]

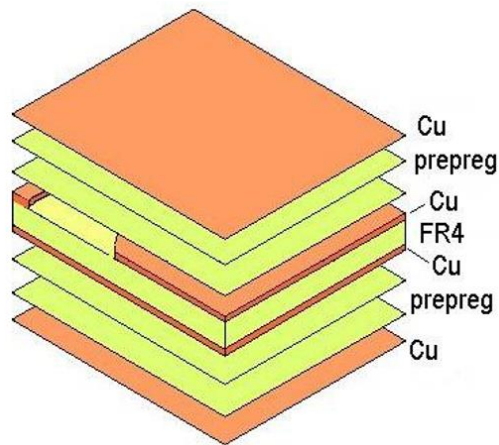
2.2 Funkce desky plošných spojů

Deska plošných spojů má několik funkcí. Ty nejdůležitější jsou uvedeny níže.

- 1) Součástkám, které jsou na ni upevněné, dává mechanickou podporu
- 2) Elektricky spojuje součástky vodiči, které jsou vytvořeny na desce plošných spojů
- 3) Poskytuje označení součástek a jejich vývodů [1]

2.3 Části desky plošných spojů

DPS (deska plošného spoje) se skládá z několika segmentů. Vícevrstvá deska je složena z jádra, Cu folie a pre pregů. V případě jednovrstvé, či dvouvrstvé desky, poslední jmenovaná část není třeba, jelikož není důvod vodivě oddělovat další úrovně. Pro názornost přikládám obrázek, který ukazuje jednotlivé části. [4]



Obr.3 Složení vícevrstvé desky plošných spojů [4]

2.3.1 Jádro

Jádro je základní část desky plošného spoje. Nejčastěji bývá vyrobeno z materiálu známého pod zkratkou FR4. Jedná se o skelný laminát a funguje jako izolant. Tloušťka jádra se pohybuje v rozmezí od 0,2 mm do 3,2 mm. Nejčastěji se však můžeme setkat s tloušťkou 1,5 mm. [1] [4]

2.3.2 Cu folie

Folie je nanесena na jádru, případně se s ní můžeme setkat v dalších vrstvách. Ve většině případů se jedná o elektrolyticky vyloučenou měď o čistotě 99,8 %. Na jádro je plátována za vysokého tlaku a teploty. V dalších vrstvách je však již vždy oddělena pre pregem. Pro vnitřní vrstvy je její tloušťka 35 μm , pro vnější vrstvy 17,5 μm . Pro rozvod napájení a také stále více pro zlepšení chlazení se používá folie dosahující 70 μm a více. Oxidace vnitřních vrstev mědi zajišťuje bezpečnější spojení mezi folií a pre pregy. [1] [2] [5]

2.3.3. Pre preg

Pre pregy, známé také pod pojmem lepící listy, jsou složeny ze skelné tkaniny impregnované pryskyřicí, jež byla částečně zpolymerizována. Úroveň polymerizace se volí tak, aby list nebyl lepkavý. Zároveň však musí pryskyřice při zahřátí opět změkknout, následně se pak za tlaku a teploty vytvrdit. Pro různé lamináty mají pre pregy odlišné vlastnosti. Mohou se lišit obsahem pryskyřice, její tekutostí nebo časem želatinace. Při spojování více vrstev je důležité, aby mezi nimi nevznikly póry nebo dutiny. [1] [2]

2.4 Výhody

Hlavní důvody, proč jsou plošné spoje využívány v sériové výrobě jsou následující.

- 1) Vysoká spolehlivost
- 2) Nízká cena vyrobeného spoje
- 3) Malá hmotnost
- 4) Ve většině případů jednoduchá opravitelnost
- 5) Teoreticky vypočtené vlastnosti obvodů se z velké části shodují s realitou
- 6) Přesné a jednoznačné určení polohy součástek
- 7) Celý proces lze snadno automatizovat [1]

2.5 Nevýhody

I když mají plošné spoje mnoho kladných vlastností, těm negativním se bohužel nevyhneme. Mezi ty nejdůležitější patří.

- 1) Vůči vibracím a rázům mají nízkou odolnost
- 2) Návrh se řídí mnoha předpisy
- 3) U složitějších technologií výroby vysoká investiční náročnost [1]

3. Technologie výroby

Pro výrobu desek plošných spojů se v současné době používají tři základní výrobní postupy: subtraktivní, aditivní a semiaditivní. Už z názvu si můžeme odvodit, v čem budou spočívat jednotlivé technologie. U subtraktivní metody se na celou plochu nanese vodivá vrstva, která je poté odstraněna na požadovaných místech. Vznikne tak daný motiv. Aditivní metoda je přesný opak subtraktivní. V tomto případě se na desku nanáší vodivá vrstva pouze v místech, kde chceme mít vodivé cesty. Semiaditivní postup kombinuje obě předchozí metody dohromady. [1]

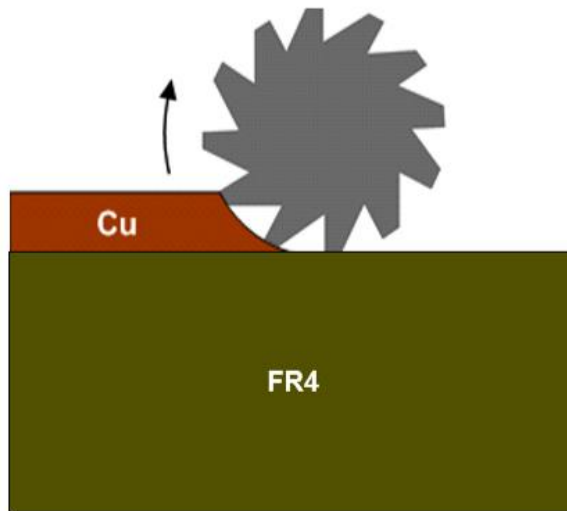
3.1 Subtraktivní metoda

V tomto případě se na celou plochu výchozího materiálu (např. FR4) nanese vodivá Cu folie. Nanesený materiál je poté odstraněn na určených místech. Proces odstranění může být proveden několika způsoby. Nejčastěji používané je však odfrézování Cu fólie pomocí frézky nebo odleptání pomocí leptadla. [1]

1) Odfrézování

Při odstraňování materiálu tímto způsobem je používána CNC frézka. Ta je pomocí počítače řízena v osách x, y, z. Výhodou této metody je rychlost a ekonomická

nenáročnost. Oproti odleptání je však méně přesná. Princip je znázorněn na obrázku č.3.[6]



Obr.4 Frézování měděné fólie na jádru z FR4 [6]

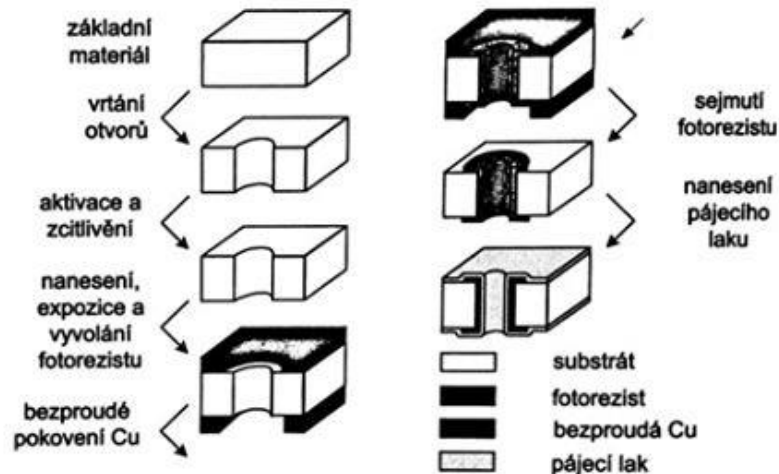
2) Odleptání

Tento postup je oproti frézování poněkud složitější. Deska z FR4 je pokryta z jedné strany Cu fólií. Na takto připravený podklad je nanesen negativní (neozářený rozpustný ve vývojce) nebo pozitivní (neozářený nerozpustný ve vodě) fotorezist. Následně je celá plocha ozářena přes masku. Fotorezist je vyvolán ve vývojce. U negativního fotorezistu je odmyta neozářená část, u pozitivního ozářená. Poté je vzorek ponořen do selektivního leptadla na Cu. Dochází k odleptání Cu na místech nepokrytých fotorezistem. Když je měď odleptána, odstraníme fotorezist sprchováním horkou vodou s 1 % etylalkoholu. Proces je dokončen. [7] [6]

3.2 Aditivní metoda

Aditivní metoda spočívá ve vytvoření vodivého obrazce na nevodivém substrátu. Pro dosažení požadovaného výsledku se používá mnoho způsobů.

Metoda je známa již dlouho a byla používána ve spotřební elektronice. Základní materiály byly nanášeny na fenolickém papíru. Výhodou byla ekonomičnost a spolehlivost. Na následujícím obrázku je popsán princip aditivního procesu výroby dvoustranného plošného spoje s pokovenými otvory. [1]



Obr. 5 Aditivní proces [1]

Dalším způsobem je použití laseru, jako ideálního zdroje tepla. Adhezivní vrstva je nanesena na nepokovený substrát. Dále se nanese vodivý prášek. Laserový paprsek postupně zahřívá předem definovaná místa. Zahřátý prášek a adhezivní vrstva se spojí. Nezahřátý prášek lze snadno z desky sejmut a znovu použít. Laser tedy píše vodivé cesty. Jako substrát se používají polyamidové, epoxidové nebo polysulfidové lamináty. Na zhotovení vodivých cest prášek z Au, Cu, In, Pd, Ag a Sn. [1]

3.3 Výroba prokovů

Prokovení otvorů se skládá z několika kroků. V současnosti se používá metoda přímého prokovu. Nejprve je nutné otvory vyvrtat. To se provádí pomocí CNC frézky. Následně je deska dokonale očištěna a odhraněna v kartáčovacím stroji. V dalším kroku je elektrostaticky nanesena 0,1 μm vrstva palladia v katalyzační lázni. Tato vrstva zajistí vodivost povrchu. Nakonec je deska vložena do pokovovací lázně. Zde probíhá proces mědění elektrolýzou. Galvanicky se nanese vrstva mědi. Prokov je dokončen. [1] [8]

4. Pájení přetavením

Pájení přetavením je jednou z forem měkkého pájení neboli pájení do 450 °C a používá se pro sériovou povrchovou montáž součástek. Princip této technologie spočívá v nanesení pájecí pasty na povrch, přiložením míst, které chceme spojit a následným zahřátím pasty, která se při dosažení určité teploty přetaví. Nanesení pájky a její ohřátí je odděleno jak časově, tak i prostorově. [1] [9]

4.1 Pájecí pasta

Pasta je složena z několika částí. Je tvořena vodivými kuličkami, tavidlem a dalšími látkami. Společná kombinace těchto složek určuje výsledný charakter pájecí pasty. Těmi je například viskozita, roztékavost či lepivost. Vývoj pájecích past významně ovlivnilo nařízení Evropské unie, které omezilo používání olova v pájkách, kvůli jeho negativnímu dopadu na životní prostředí. Jeho použití je povolené pouze v oblastech, kde je požadována maximální spolehlivost. Těmi jsou například lékařství či letecký nebo kosmický průmysl. Pájky bez olova mají horší vlastnosti a přetavují se zpravidla při vyšších teplotách (existují však i výjimky, například pájka SnBi se přetavuje při 140 °C). Vliv vysoké teploty může způsobit například prasknutí prokovu. Na tuto tematiku je zaměřena moje praktická část. [1] [12]

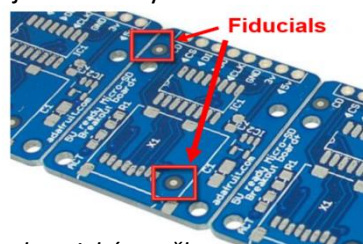
Vodivé kuličky tvoří přibližně 85 % - 90 % z celkového objemu pasty. Jejich velikost je volena od 5 µm do 160 µm podle pravidla, které říká, že do nejmenšího otvoru šablony by se mělo vejít pět kuliček. Jejich úkolem je vodivě propojit pájené části. [1] [4]

Tavidlo, nezbytná součást pájecí pasty, svou přítomností zlepšuje podmínky pro pájení. Je pouze mírně aktivované (aktivace se děje pomocí zahřátí). Svým působením zlepšuje smáčivost, odstraňuje vzniklé oxidy a zabraňuje další oxidaci pájeného povrchu. [1] [10]

Pasta musí být nanášena na podklad. Díky viskózní konzistenci lze pastu nanést rovnoměrně. Používá se několik technik. Pro výrobu sériovou je využíváno sítotisku nebo šablonového tisku. V těchto případech je pasta nanášena najednou na mnoho plošek. Množství nanášeného materiálu určuje tloušťka šablony. Na kusovou výrobu nebo ruční opravy je používán dávkovač. Ten si můžeme představit jako injekci naplněnou pastou. Ta je tlakem vytlačována ven a nanášena na požadovaná místa. [10] [1]

4.2 Osazení součástek

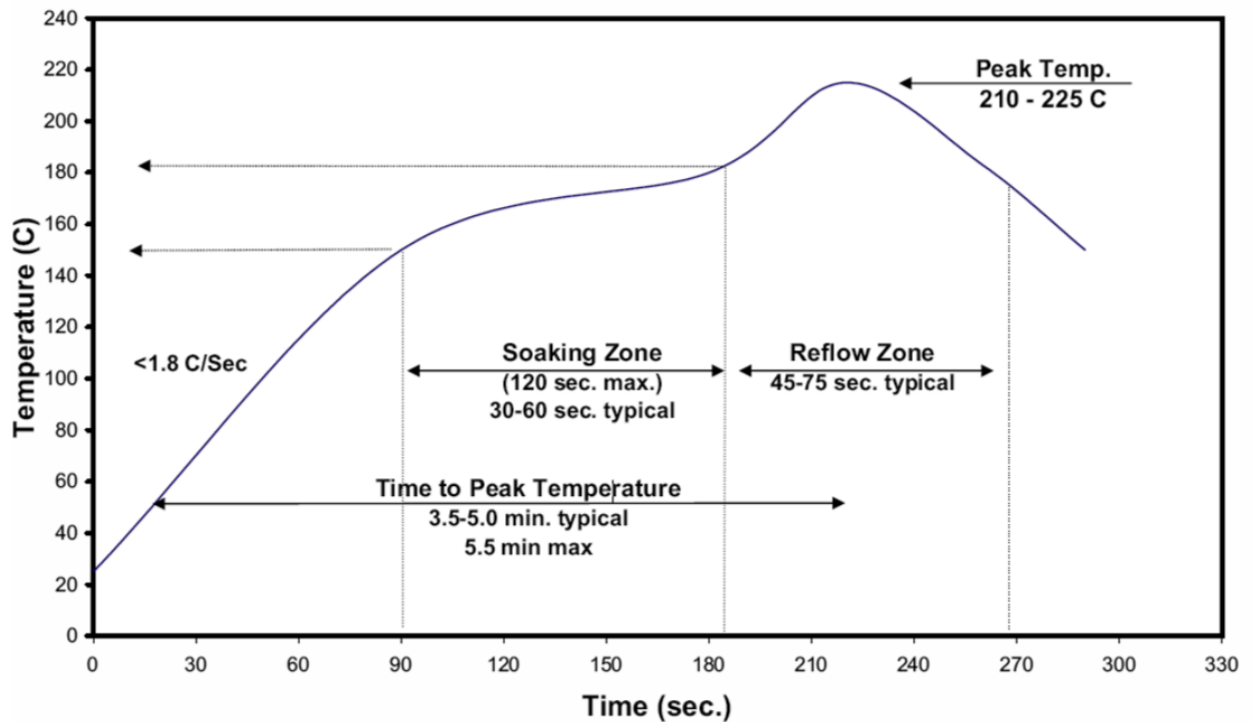
Do nanášené pasty se poté umístí dané součástky. Pro sériovou výrobu jsou využívány programovatelné osazovací automaty. Ty pomocí podtlaku uchopí součástku a umístí ji na předem definované místo. Na desce plošného spoje by měly být optické značky, díky kterým se automaty orientují. Při kusové výrobě umísťuje součástky na desku samotný uživatel pomocí trysky schopné podtlaku. [4] [10]



Obr.6 Příklad optické značky pro osazovací automaty

4.3 Přetavení pasty

V momentě, kdy máme nanosenou pastu a osazené součástky, můžeme začít zahřívát. Pastu je nutno zahřát na teplotu, kterou uvedl výrobce. Při tomto zahřívání je důležité dodržet výrobcem stanovený nárůst teploty i dobu zahřívání při určitých teplotách. Tyto hodnoty výrobce udává jako teplotní profil pasty. Ten si můžeme představit jako graf, kde je na ose x vynesena čas a na ose y teplota. [4] [10]



Obr. 7 Příklad teplotního profilu [11]

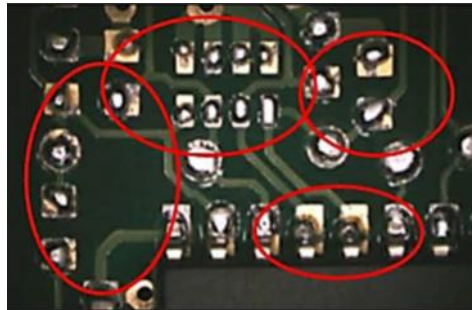
Procesy přetavení jsou rozděleny podle způsobu, jakým je teplo dodáno. Používá se pájení zářením, pájení laserem, pájení impulzní a kondenzační v parách. Ve své práci jsem použil pájení konvekcí (horkým vzduchem), které funguje na principu cirkulace horkého plynu v peci. [10] [1]

5. Chyby při pájení přetavením

Při pájení přetavením může docházet ke vzniku různých chyb. Tyto chyby ovlivňují pak funkčnost celého systému. V krajních případech může dojít i k ohrožení obsluhy daného zařízení. Některé z těchto chyb budou uvedeny v následujících kapitolách. [10] [11]

5.1 Nesmáčivost

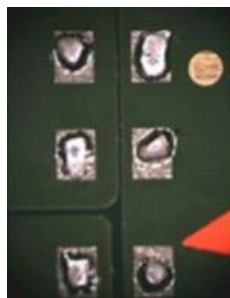
O nesmáčivosti hovoříme v případě, pokud plocha pájecí plošky není zcela pokryta pájkou. Pájka místo pokrytí celé plochy vytvoří na jejím povrchu kapky díky nepotlačení vlivu povrchového napětí. Možnými příčinami je nedostatečně aktivované tavidlo, nedostačující množství nanesené pájky nebo nedostačující prohřátí spoje. Příklad nesmáčivosti je zaznamenán na obrázku č.8. [10] [11]



Obr. 8 Příklad nesmáčivosti na DPS [10]

5.2 Odsmásčeni

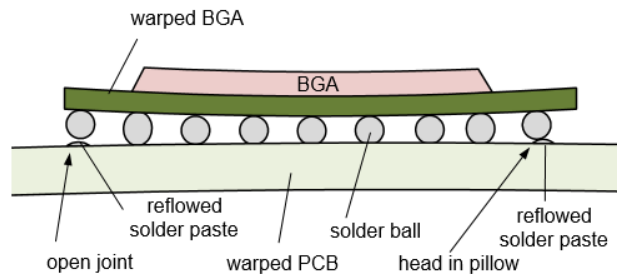
Odsmásčeni je chyba, při které dochází k nerovnoměrnému rozložení pájky na pájecích ploškách. Příčinou je nadměrné zahřátí spoje. Tím dochází ke vzniku intermetalických vrstev, což způsobuje změnu složení pájecí slitiny – ta změní svou smáčivost a stáhne se do sebe. [10] [13]



Obr. 9 Příklad odsmásčeni DPS [10]

5.3 Prohnutí pouzdra

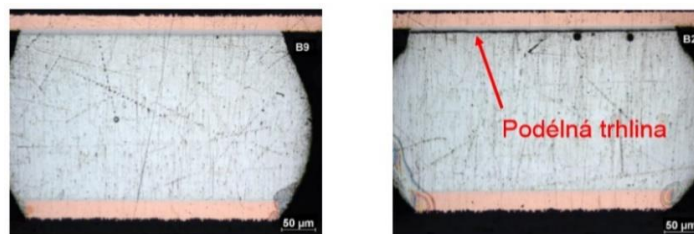
Prohnutí pouzdra, neboli Warpage efekt, je jev způsobený rozdílnými koeficienty teplotní roztažnosti desky plošného spoje a pájené součástky. Při ohřevu nebo chlazení zde dochází k deformaci desky plošného spoje a pouzdra součástky. [13] [10]



Obr.10 Příklad prohnutí pouzdra [11]

5.4 Trhliny

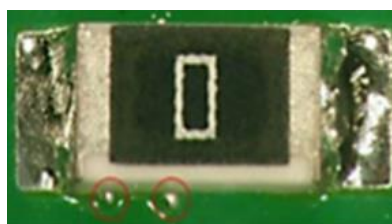
Další chybou při pájení může být vznik trhlin. K tomu dochází mechanickým a tepelným namáháním pájené části. Trhliny se pak objevují na nejslabších místech spoje. Místa vzniku trhlin ovlivňuje použitý materiál nebo typ pájení. Trhliny se nemusí objevit ihned. Někdy vzniknou až po delším čase vlivem vnitřního pnutí. Obrázek č.11 ukazuje podélnou trhlinu, která vznikla během pájení BGA pouzdra. [10] [11]



Obr.11 Ukázka trhliny [11]

5.5 Kuličky pájky

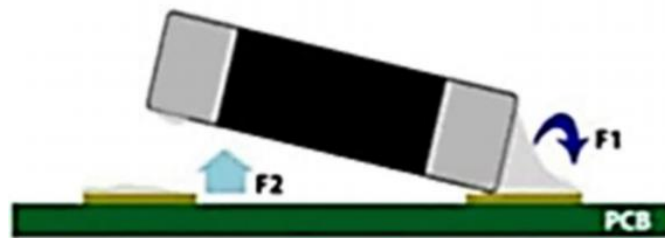
Při nanášení pájecí pasty je nanášeno na pájecí plošky nadbytečné množství pájky nebo je dokonce nanášeno mimo. Když dojde k přetavení, z pasty se stanou kuličky. V místech, kde jsou kuličky, může docházet ke tvorbě zkratů. [10]



Obr.12 Kuličky pájky mimo určené místo [10]

5.6 Tombstoning

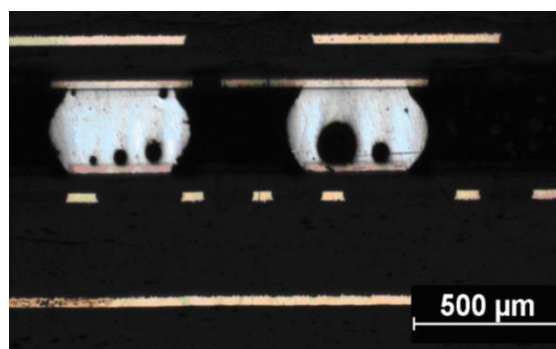
Tombstoning, známý také pod pojmem efekt náhrobního kamene, je jev, který postihuje zejména malé SMD součástky. Vlivem nestejnsměrných sil působících na součástku z obou stran dochází k zvednutí součástky na jedné straně. Nestejnsměrné síly jsou způsobeny odlišnou velikostí pájecích plošek, odlišnou smáčivostí pasty, nevhodným nanesením pasty či rozdílným časem, během kterého byla pájecí pasta přetavována. [10]



Obr. 13 Tombstoning [10]

5.7 Voidy

Voidy jsou dutinky nebo dutiny v pájených spojkách. Jejich přítomnost má nepříznivý vliv na mechanické, elektrické a tepelné vlastnosti pájeného spoje. Vznikají díky různým vlivům. Podle toho se také dělí na několik typů. Největší dutinky nazýváme makrovoidy. Vznikají díky vypařování plynu z tavidel a pájecích past při pájení přetavením. Jejich velikost dosahuje hodnot mezi 100 až 300 μm . Dále jsou známy ještě mikrovoidy, Shrinkage voidy a Kirkendallov voidy. [10] [11]



Obr.14 Makrovoidy [11]

5.8 Whiskery

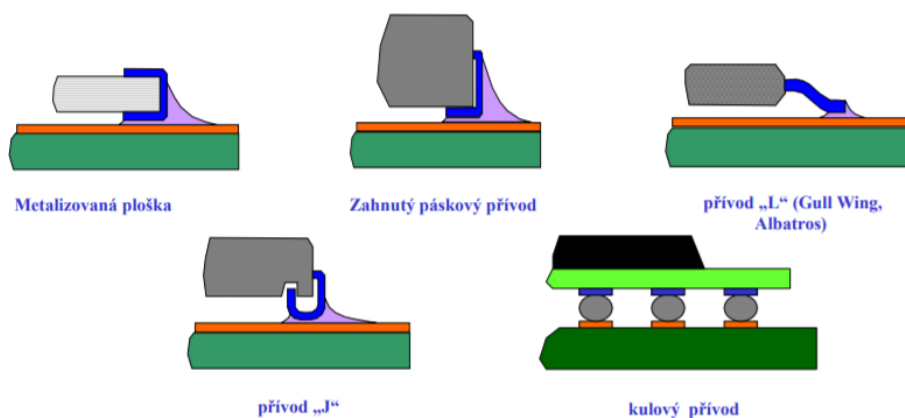
Whiskery jsou drobné vlásky, které rostou z povrchu některých kovů. Nebezpečí jejich přítomnosti spočívá v možném propojení vodivých cest a následného vzniku zkratu. Vlasek je tvořen z čistého kovu – u pájek tvořených cínem se jedná o čistý cín. Tato chyba je známa již z 50. let minulého století. Nyní se tato problematika opět řeší díky bezolovnatému pájení, kde cín tvoří vysoký obsah slitiny. Whisker může dorůst délky 1 cm a rychlost růstu se pohybuje od cca 50 $\mu\text{m}/\text{rok}$ až po 1 cm/rok . Růst je ovlivňován vlhkostí, teplotou, elektrickým polem a tlakem. [10] [11]



Obr.15 Růst whiskerů [11]

6. Pouzdra pro technologii SMT

S příchodem technologie SMT (surface mount technology) během 80.let, při které se součástky montují na desku z jedné strany a vývody se neprovlékají deskou jako u technologie THT (through hole technology), bylo potřeba vymyslet způsob, jakým daná zařízení jednoduše uchytit na desku plošného spoje. Za tímto účelem vzniklo velké množství různých typů pouzder, ve kterých jsou součástky uloženy a následně jsou i s těmito pouzdry připájeny. Pouzdra se mohou lišit svou velikostí, tvarem, počtem vývodů či typem vývodů. Existují i v bezvývodovém propojení, kde je pokovena celá strana pouzdra. V dalších kapitolách přiblížím některé typy pouzder. Na následujícím obrázku jsou znázorněny základní typy vývodů součástek. [1]



Obr.16 Různé typy vývodů součástek SMD (surface mount devices) [23]

6.1 Pouzdro typu MELF

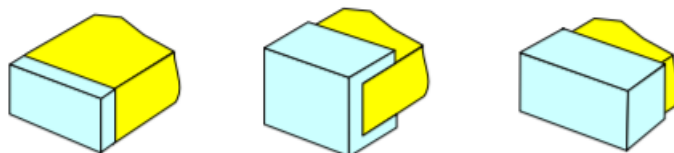
Pouzdra typu MELF (metal electric face) se používají pro rezistory a diody. Jedná se o keramický válec, který má pokovenou horní a dolní stranu. Ty slouží jako vývody. Výhodou této součástky je její nízká cena. Hlavní nevýhodou je válcovitý tvar. Kvůli němu dochází k pohybu součástky během pájení. [23] [24]



Obr. 17 Pouzdro typu MELF [23]

6.2 Pouzdro typu flat chip

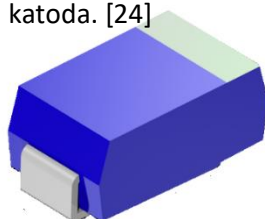
Tato pouzdra jsou jedna z nejnámějších a nejvíce používaných. Nejvíce se používají pro rezistory a kondenzátory, ale ani použití pro tlumivky či diody není neobvyklé. Mají tvar kvádru, který má vývody po stranách. Hlavní výhodou je snadná manipulace díky možnosti uchopení součástky vakuovými přístroji. Nevýhodou je nutnost rozlišit horní a spodní část (zejména u odporů). [23] [24]



Obr.18 Různé typy pokovení strany pouzdra flat chip [23]

6.3 Pouzdro typu SMA

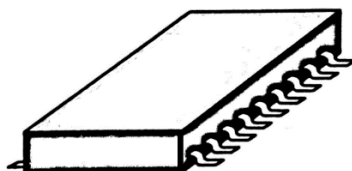
Tento typ pouzdra umožňuje pomocí technologie SMT osadit desku diodami s vyšším výkonem než například u pouzdra typu MELF. Má tvar kvádru, který je většinou černý. Na stranách najdeme kontakty, které jsou zahnuty podél bočních stěn pod diodu. Světlý pruh na jedné straně součástky označuje stranu, kde je vyvedena katoda. [24]



Obr. 19 Pouzdro typu SMA [24]

6.4 Pouzdra SOP a jejich modifikace

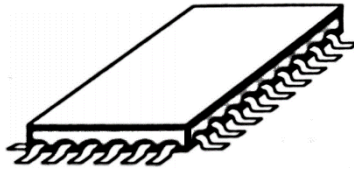
Pouzdra SOP (small outline packages) jsou velmi často používaná. Jsou vyráběna z plastu nebo keramiky. Mají několik vývodů po stranách. Tvar těchto vývodů připomíná racci křídlo. Velice podobným pouzdrem je typ SOJ, který se od předešlého liší pouze tvarem vývodu, který je do "J", a šetří tak místo na desce. Pokud tato pouzdra používáme pro zapouzdření tranzistoru, hovoříme o typu SOT. V případě diod pak SOD. Můžeme se setkat i s typem TSOP, který má sníženou výšku a vyšší hustotu propojů, či s typem MSOP (micro small outline packages). [1] [24]



Obr. 20 Pouzdro typu SOP [1]

6.5 Pouzdra FP a jejich modifikace

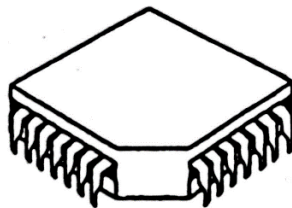
Tato pouzdra jsou malá, lehká a levná. Díky těmto vlastnostem jsou hojně využívána ve spotřební elektronice. Pouzdra se vyrábí ve tvaru obdélníku nebo čtverce a vývody mají tvar racčího křídla. Nejčastěji je využíván typ QFP (quad flat package), který má vývody po všech čtyřech stranách. Dalším typem je TQFP (thin quad flat package), který je oproti QFP nižší. Výška se pohybuje v rozmezí 1,0 – 1,4 mm. [1]



Obr.21 Pouzdro typu QFP [1]

6.6 Pouzdra typu PLCC

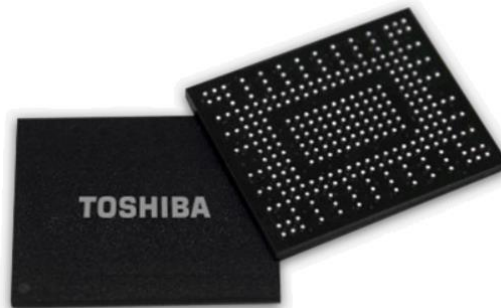
Pouzdra typu PLCC (plastic leaded chip carrier) jsou charakteristická tím, že mají vývody na všech stranách. Jedná se o vývody přímé nebo typu "J". Tento typ může mít nejvíce 124 vývodů a je vyroben z plastu. [1]



Obr. 22 Pouzdro typu PLCC [1]

6.7 Pouzdra typu BGA

Typ BGA (ball grid array) je hojně využíván pro pouzdra, kde je třeba velikého počtu vývodů. Ty jsou kulového tvaru a při velikosti pouzdra 50 x 50 mm jich na spodní straně najdeme až 49 x 49. Nejčastěji jsou vyráběna z plastu nebo keramiky. Mezi největší nevýhody patří obtížná kontrola kvality připojení pouzdra na desku plošného spoje a složitý proces při opravování. V pravé části následujícího obrázku můžeme vidět spodní část pouzdra s kulovými vývody. [1]



Obr. 23 Pouzdro typu BGA [25]

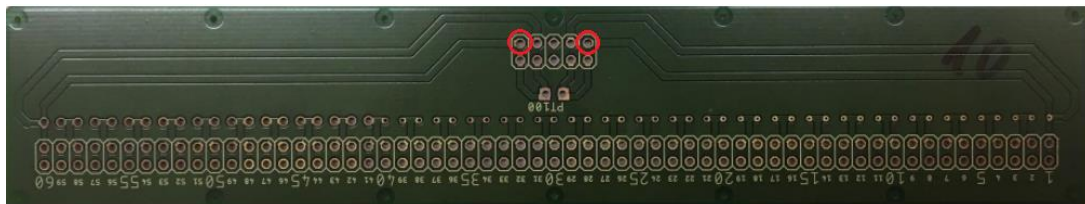
7. Praktická část

V praktické části bylo mým úkolem připravit si desky plošného spoje, nalézt dva teplotní profily a poté zkoumat, jak se mění vlastnosti prokovů v závislosti na opakovaném zahřívání.

Deska plošného spoje obsahovala několik desítek do série uspořádaných prokovů. Použil jsem 6 kusů desek. Desky byly všechny stejné. Jediné, čím se lišily, byla tloušťka mědi nanesené na prokovech. Používal jsem tloušťky 10, 20 a 30 μm .

Poté jsem na horkovzdušné peci našel dva teplotní profily, které odpovídají reálným požadavkům na přetavení určitých typů pájecích past. Profily jsem změřil pomocí profilometru, jelikož hodnoty nastavené na peci se liší od skutečné teploty na přetavované desce. Celý proces proběhl tak, že jsem připájel dva termočlánky na pomocnou DPS, tu jsem vložil do pájecí pece a celý průběh zaznamenal v programu KIC 2000.

V momentě, kdy jsem našel dva vhodné profily, změřil jsem si čtyřbodovou metodou odpor desky plošného spoje před zahřátím. Odpor jsem měřil na místech vyznačených na obrázku č.23.



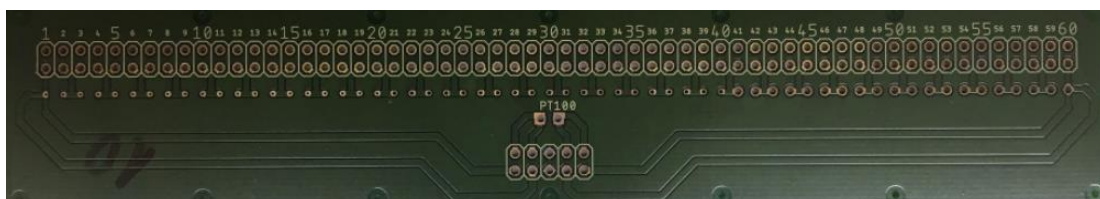
Obr. 23 Místa pro měření odporu prokovů

Následně jsem desky posílal opakovaně do pece. Poté jsem vždy počkal, až vychladnou na pokojovou teplotu (v laboratoři bylo 23 °C) a změřil jejich odpor. Hodnoty jsem si zaznamenával a následně vynesl do grafu.

7.1 Popis použitých zařízení

Deska plošných spojů

Jedná se o dvouvrstvou desku, jejíž jádro je tvořeno z materiálu FR4. Následně je v ní vyhotoveno velké množství prokovů různých velikostí. Všechny jsou spojeny do série. Celkově jsem použil 6 desek. Na obrázku č. 14 lze vidět rozložení prokovů na DPS.



Obr.24 Deska plošného spoje

Mistral 260

Pro přetavení jsem si vybral metodu přetavení pomocí horkého vzduchu. Používal jsem pec Mistral 260. Je to horkovzdušná pec, která je vybavena dotykovým displejem, kde se dá nastavit teplota všech tří zón a rychlost posuvu pásového dopravníku.



Obr. 25 Horkovzdušná pec Mistral 260 [14]

Ohmmetr

Ohmmetr jsem použil pro vyhodnocování kvality prokovů. Použil jsem HP 4263A, který umožňuje měření čtyřbodovou metodou, která je oproti té klasické přesnější.



Obr. 26 Ohmmetr HP 4263A [16]

Profilometr

Profilometr se používá pro změření teplotního profilu při pájení přetavením. Nejprve jsem musel termočlánky spojené s profilometrem připájet na pomocnou DPS. Poté zařízení pomocí USB propojit s počítačem a v programu KIC 2000 zaznamenat hodnoty.



Obr. 27 Profilometr

Termočlánek

Tyto termočlánky jsem použil pro zjištění teploty DPS po vychladnutí desek. Jelikož odpor je závislý na teplotě, bylo nutné měřit ho vždy při stejné teplotě. K tomu jsem právě použil termočlánek Lutron TM-914C.



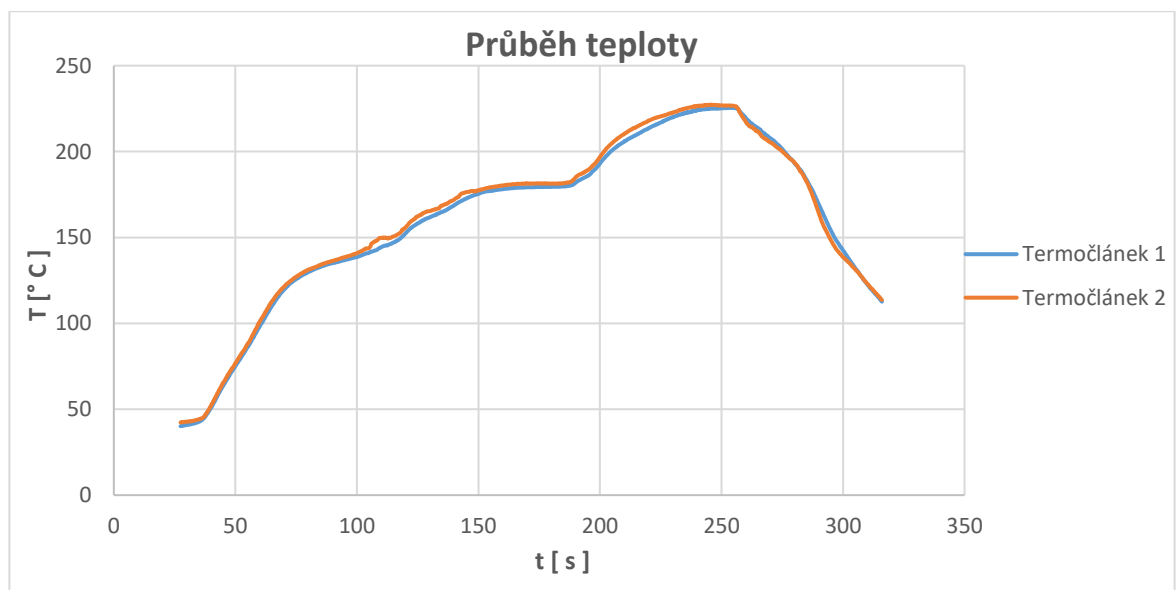
Obr. 28 Termočlánek [15]

7.2 Změřené hodnoty

Pro první teplotní profil jsem nastavil na peci následující hodnoty:

- Pre heat 1: 155 °C
- Pre heat 2: 188 °C
- Reflow: 232 °C
- Speed (rychlost posuvu): 15 cm/min

První teplotní profil vyšel následovně:



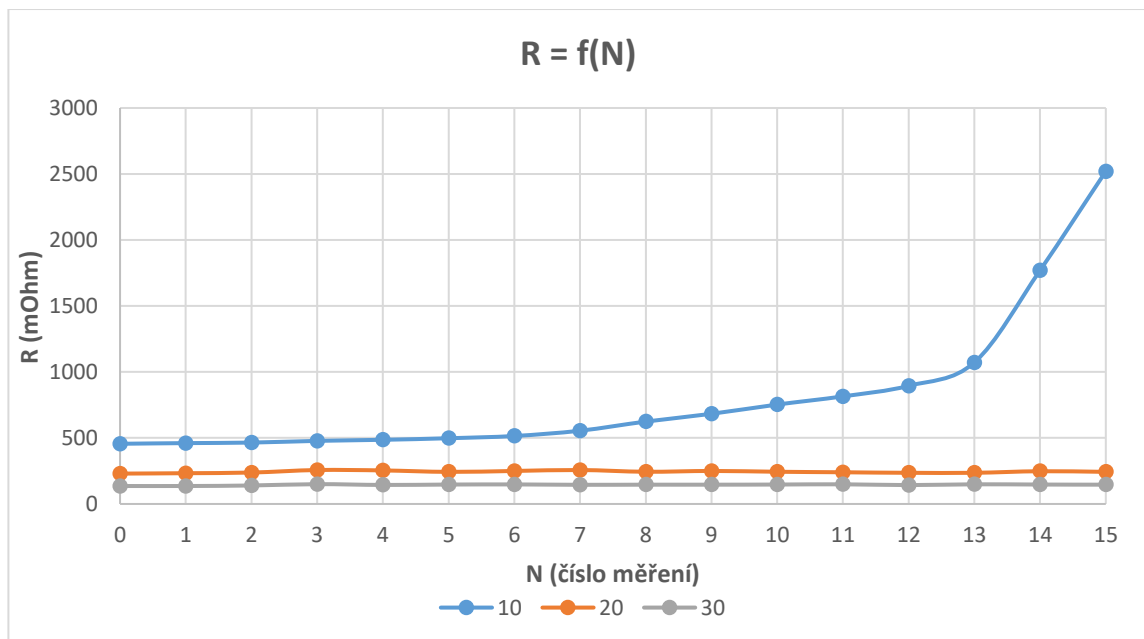
Obr. 29 Naměřený první teplotní profil

Z grafu lze vyčíst, že nejvyšší teplota dosáhla hodnoty 227°C.

Pro desky, které byly ohřívány podle tohoto průběhu, jsem zaznamenal následující hodnoty:

N (počet zahřátí)	Odpor DPS [mΩ]		
	Tloušťka 10 μm	Tloušťka 20 μm	Tloušťka 30 μm
0	491	270	181
1	496	273	181
2	500	278	185
3	513	297	195
4	521	294	189
5	533	283	192
6	550	290	193
7	590	297	190
8	659	284	191
9	718	290	191
10	788	284	192
11	850	280	194
12	930	276	188
13	1107	276	194
14	1805	288	192
15	2555	283	191

Graf naměřených hodnot pro první teplotní profil:



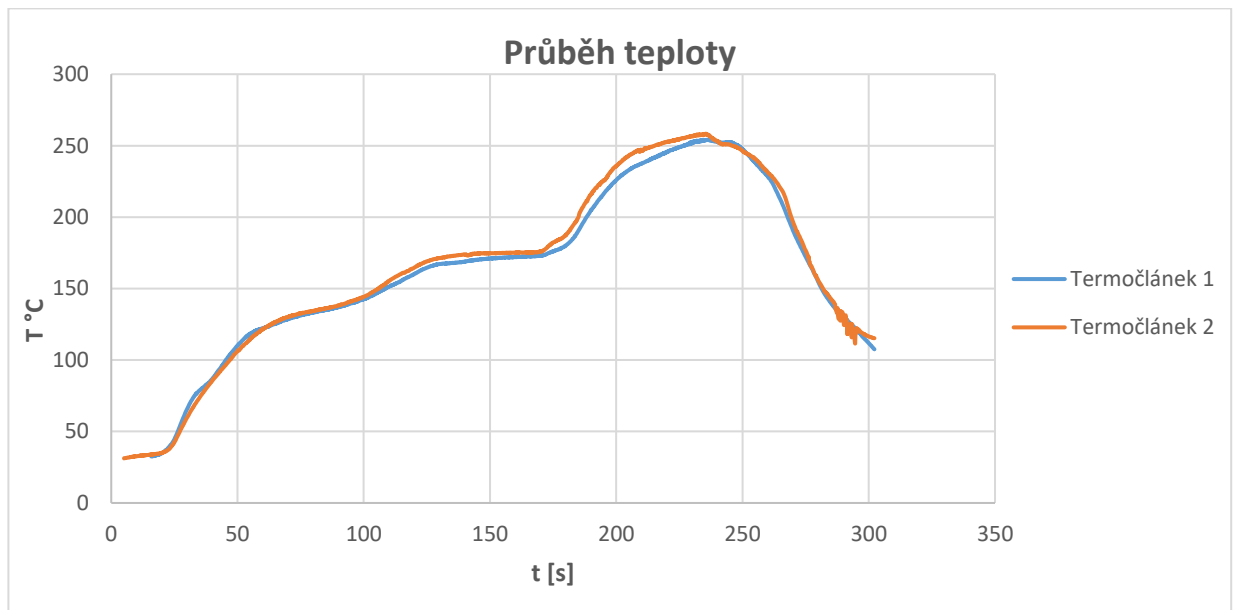
Obr. 30 Závislost odporu na počtu zahřátí pro první teplotní profil

Z grafu lze vyčíst, že tloušťka prokovu hraje důležitou roli. Zatímco u tloušťky 20 μm a 30 μm se odpor téměř nemění, u nejmenší tloušťky se od určitého bodu začne odpor zvyšovat a každým dalším zahřátím roste. Po patnáctém zahřátí už odpor nešlo změřit. To bylo způsobeno tím, že praskl některý z prokovů a obvod byl rozpojen.

Pro druhý teplotní profil jsem nastavil tyto hodnoty:

- Pre heat 1: 155 °C
- Pre heat 2: 185 °C
- Reflow: 269 °C
- Speed (rychlost posuvu): 15 cm/min

Druhý teplotní profil vyšel následovně:



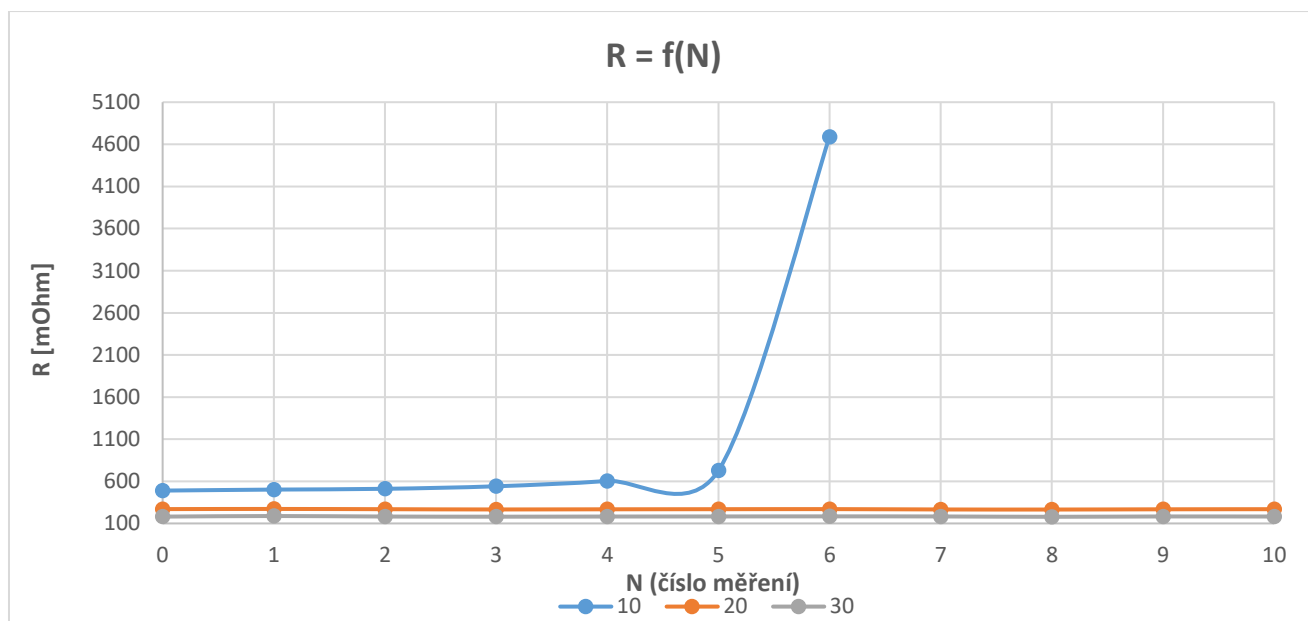
Obr. 31 Naměřený druhý teplotní profil

Oproti minulému profilu jsem nastavil vyšší teplotu v části reflow. Nejvyšší hodnota zde tak dosahuje 255 °C.

Pro desky, které byly ohřívány podle tohoto průběhu, jsem zaznamenal následující hodnoty:

N (počet zahřátí)	Odpor DPS [mΩ]		
	Tloušťka 10 μm	Tloušťka 20 μm	Tloušťka 30μm
0	490	270	181
1	502	272	188
2	511	269	182
3	541	266	180
4	604	268	182
5	727	269	183
6	4690	270	184
7		266	183
8		265	179
9		268	183
10		269	182

Graf naměřených hodnot pro druhý teplotní profil:



Obr. 32 Závislost odporu na počtu zahřátí pro druhý teplotní profil

Stejně jako u předchozího grafu můžeme vidět, že u prokůvů o tloušťce 20 a 30 μm nedochází k žádné výrazné změně. Odpor se však celkem razantně mění u prokovu o tloušťce 10 μm , tomu roste odpor již od prvního přehřátí a po šestém přehřátí již odpor nebylo možné změřit vůbec. Prokov praskl tedy dříve než v prvním případě.

7.3 Zhodnocení praktické části

Z grafů naměřených hodnot lze vyčíst, že vlastnosti prokůvů ovlivňuje tloušťka nanesené mědi a teplota. Pro tloušťky 20 a 30 μm nedochází k žádné výrazné změně ani při vyšší teplotě. U vzorku s tloušťkou 10 μm hraje teplota důležitou roli. Při prvním teplotním profilu se odpor z počátku téměř neměnil. S narůstajícím počtem opakování zahřívání se však odpor zvyšoval stále více a více. U druhého profilu se odpor u tloušťky desek 20 a 30 μm znovu téměř neměnil. U nejslabší tloušťky však odpor vzrostl již po prvních dvou zahřátích o 20 m Ω a praskl po šestém zahřátí.

Při sériovém pájení přetavením je deska zahřata pouze jednou, maximálně dvakrát na požadovanou teplotu přetavení. Můžeme tedy říci, že prokovy jsou spolehlivé i při bezolovnatém pájení a vyšší teplota na ně nemá téměř žádný vliv.

Zajímavým faktem však je, že opakované zahřívání prokovu tloušťky 10 μm má za následek zhoršování jeho vlastností a jeho následnou degradaci. Teplota zde hraje důležitou roli. Čím vyšší byla teplota, tím dříve prokov praskl. Tuto skutečnost je nutné brát v potaz při použití desky v podmínkách, kde dochází k jejímu ohřevu.

8. Ekonomická část

V ekonomické části budu pracovat s výstupem praktické části. Zjistil jsem, že opakované zahřátí desky zhoršuje vlastnosti prokovů a že v některých případech může dojít i k jejich prasknutí. Pak je tedy deska plošného spoje nefunkční a musí být vyměněna za novou.

Pokusím se zhodnotit, zda se v případě náhrady desky plošného spoje vyplatí součástky odpájet, očistit a znovu použít nebo jestli je ekonomičtější použít součástky nové. Porovnání bude udělané ve formě tabulky, kde budou uvedeny základní typy součástek SMD společně s jejich cenou, časem potřebným pro uvedení do stavu, kdy budou znovu použitelné, ekonomickým zhodnocením procesu a výstupu, která z předchozích dvou metod bude výhodnější. Porovnání bude vždy uděláno pro situaci výměny 1000 stejných součástek. Náklady spojené s připájením dané součástky na novou desku už nebudu zahrnovat do úvahy. Jsou totiž pro oba způsoby totožné.

V mé úvaze budu vycházet z předpokladu, že součástky z desky plošného spoje odjímá zaměstnanec, který je ohodnocen hodinově a jeho hrubá měsíční mzda odpovídá průměrné mzdě v České republice. Ta činila ve čtvrtém čtvrtletí roku 2017 rovných 31 646 Kč. Superhrubá mzda, tedy přímý náklad zaměstnavatele na zaměstnance, je v tomto případě 42 406 Kč za měsíc. [17]

Náš modelový zaměstnanec odpracuje za měsíc 160 hodin. Jedna hodina práce zaměstnance stojí zaměstnavatele po zaokrouhlení 265 Kč. Doba, kterou zaměstnanec bude potřebovat na odejmutí součástky, je odborně odhadnuta vedoucím mé práce na základě jeho odborných znalostí a zkušeností.

Zaměstnanec bude pro odpájení součástek používat horkovzdušnou stanici Solomon SR-979, která umožňuje nastavení teploty od 100 °C do 400 °C. Příkon této stanice je 275 W. [19]

K očištění vývodů součástky je zapotřebí mikropáječka a tavidlo. Používáme pájecí stanici DIAMETRAL HBT – 1050, jejíž příkon je 50 W. Jako tavidlo se bude používat ELCHEMCO S-FUTURE REWORK JELLY. Při čištění jedné součástky se spotřebuje přibližně 0,1 g tavidla. Cena za 30 g činí 455 Kč. [20] [21]

Pro zjednodušení výpočtů budeme uvažovat, že firma má již horkovzdušnou stanici a mikropáječku zakoupenou, jelikož je využívala k jinému účelu. Nebudeme je tedy započítávat do nákladů na výměnu součástky.

Ke spočtení nákladů na elektřinu vycházím z příkonů obou zařízení. Ta běží celou dobu procesu ohřívání a čištění. Průměrná cena v České republice za 1 kWh činila v květnu roku 2018 3,82 Kč. [22]

Pro zhodnocení jsem vybral následující běžně používané součástky. Ty jsem vyhledával v internetovém obchodě společnosti GM electronic, spol. s.r.o. Snažil jsem se vybírat součástky rozdílného typu, s rozdílnými pouzdry a v různých cenových hladinách tak, aby se na konci daly určit skupiny součástek, pro které bude proces výhodný. [18]

Seznam hodnocených součástek

- Komparátor MCP6541-I/SN SO8 MICROCHIP
- Keramický kondenzátor CKS1812 1u/100V X7R 10% AVX
- Keramický kondenzátor CKS0805 100n/50V X7R 10% YAGEO
- Bipolární tranzistor BDP950 SOT223
- Bipolární tranzistor BC807-16 SOT23
- High performance programmable timer / counter 82C54 SMD
- Bipolární tranzistor AT-31625 MSOP3
- Paměť fram FM31L276 SMD
- Schottkyho dioda SS16
- Schottkyho dioda HSMS-2822
- SMD Rezistor R0805 1M2 1% YAGEO
- SMD Rezistor R0805 4k7 0.1% YAGEO
- Varistor SIOV-CN1812K60G
- Mikrokontrolér ATmega64-16AU TQFP64 ATMEL

8.1 Příklady výpočtů

Náklady na zaměstnance pro 1000 kusů [Kč] = Celková doba odpájení a očištění 1000 ks [h] * 265 Kč

Náklady na elektřinu pro 1000 kusů [Kč] = (Celková doba odpájení[h] * příkon stanice SOLOMON [kW] + Celková doba očištění 1000 kusů [h] * příkon mikropáječky DIAMETRAL [kW]) * Cena za 1 kWh [Kč]

Náklady na tavidlo pro 1000 kusů [Kč] = (Cena za 30 g tavidla [Kč] / hmotnost tavidla [g]) * spotřeba na jednu součástku [g] * počet kusů

Celkové náklady na 1000 kusů [Kč] = Náklady na zaměstnance pro 1000 kusů [Kč] + Náklady na elektřinu pro 1000 kusů [Kč] + Náklady na tavidlo pro 1000 kusů [Kč]

8.2 Tabulka pro porovnání dob potřebných k odpájení a očištění

Název součástky	Doba potřebná pro odpájení 1 kusu [min]	Celková doba pro odpájení 1000 kusů [h]	Doba potřebná pro očištění jednoho kusu [min]	Celková doba pro očištění 1000 kusů [h]
Komparátor MCP6541-I/SN SO8 MICROCHIP	3	50,0	2	33,33
Keramický kondenzátor CKS1812 1u/100V X7R 10% AVX	2	33,3	0	0,00
Keramický kondenzátor CKS0805 100n/50V X7R 10% YAGEO	2	33,3	0	0,00
Bipolární tranzistor BDP950 SOT223	2	33,3	1	16,67
Bipolární tranzistor BC807-16 SOT23	2	33,3	1	16,67
High performance programmable timer / counter 82C54 SMD	3	50,0	2	33,33
Bipolární tranzistor AT-31625 MSOP3	2	33,3	1	16,67
Paměť fram FM31L276 SMD	3	50,0	2	33,33
Schottkyho dioda SS16	2	33,3	0	0,00
Schottkyho dioda HSMS-2822	2	33,3	0	0,00
SMD Rezistor R0805 1M2 1% YAGEO	2	33,3	0	0,00
SMD Rezistor R0805 4k7 0.1% YAGEO	2	33,3	0	0,00
Varistor SIOV-CN1812K60G	2	33,3	0	0,00
Mikrokontrolér ATmega64-16AU TQFP64 ATMEL	3	50,0	2	33,33

Některé součástky není potřeba očišťovat, proto je v kolonce Doba potřebná pro očištění jednoho kusu uvedena hodnota 0 minut.

8.3 Tabulka pro porovnání a vypočtení nákladů

Název součástky	Náklady na zaměstnance (pro 1000 kusů) v Kč	Náklady na elektřinu pro odpájení a očištění 1000 kusů	Náklady na tavidlo pro 1000 kusů	Celkové náklady na výměnu 1000 kusů v Kč
Komparátor MCP6541-I/SN SO8 MICROCHIP	22 083,33 Kč	58,89 Kč	1 516,67 Kč	23 658,89 Kč
Keramický kondenzátor CKS1812 1u/100V X7R 10% AVX	8 833,33 Kč	35,02 Kč	0,00 Kč	8 868,35 Kč
Keramický kondenzátor CKS0805 100n/50V X7R 10% YAGEO	8 833,33 Kč	35,02 Kč	0,00 Kč	8 868,35 Kč
Bipolární tranzistor BDP950 SOT223	13 250,00 Kč	38,20 Kč	1 516,67 Kč	14 804,87 Kč
Bipolární tranzistor BC807-16 SOT23	13 250,00 Kč	38,20 Kč	1 516,67 Kč	14 804,87 Kč
High performance programmable timer / counter 82C54 SMD	22 083,33 Kč	58,89 Kč	1 516,67 Kč	23 658,89 Kč
Bipolární tranzistor AT-31625 MSOP3	13 250,00 Kč	38,20 Kč	1 516,67 Kč	14 804,87 Kč
Paměť fram FM31L276 SMD	22 083,33 Kč	58,89 Kč	1 516,67 Kč	23 658,89 Kč
Schottkyho dioda SS16	8 833,33 Kč	35,02 Kč	0,00 Kč	8 868,35 Kč
Schottkyho dioda HSMS-2822	8 833,33 Kč	35,02 Kč	0,00 Kč	8 868,35 Kč
SMD Rezistor R0805 1M2 1% YAGEO	8 833,33 Kč	35,02 Kč	0,00 Kč	8 868,35 Kč
SMD Rezistor R0805 4k7 0.1% YAGEO	8 833,33 Kč	35,02 Kč	0,00 Kč	8 868,35 Kč
Varistor SIOV-CN1812K60G	8 833,33 Kč	35,02 Kč	0,00 Kč	8 868,35 Kč
Mikrokontrolér ATmega64-16AU TQFP64 ATMEL	22 083,33 Kč	58,89 Kč	1 516,67 Kč	23 658,89 Kč

8.4. Tabulka pro vyhodnocení způsobu

Název součástky	Cena (při koupi více než 500 ks)	Náklad na výměnu 1 kusu	Typ pouzdra součástky	Porovnání způsobu
Komparátor MCP6541-I/SN SO8 MICROCHIP	14,40 Kč	23,66 Kč	SOP	NOVÁ
Keramický kondenzátor CKS1812 1u/100V X7R 10% AVX	45,00 Kč	8,87 Kč	FLAT CHIP	ODPÁJET
Keramický kondenzátor CKS0805 100n/50V X7R 10% YAGEO	1,20 Kč	8,87 Kč	FLAT CHIP	NOVÁ
Bipolární tranzistor BDP950 SOT223	9,68 Kč	14,80 Kč	SOT	NOVÁ
Bipolární tranzistor BC807-16 SOT23	0,67 Kč	14,80 Kč	SOT	NOVÁ
High performance programmable timer / counter 82C54 SMD	217,00 Kč	23,66 Kč	PLCC	ODPÁJET
Bipolární tranzistor AT-31625 MSOP3	93,01 Kč	14,80 Kč	MSOP	ODPÁJET
Paměť fram FM31L276 SMD	235,82 Kč	23,66 Kč	SOP	ODPÁJET
Schottkyho dioda SS16	3,81 Kč	8,87 Kč	SMA	NOVÁ
Schottkyho dioda HSMS-2822	12,10 Kč	14,80 Kč	SOT	NOVÁ
SMD Rezistor R0805 1M2 1% YAGEO	0,28 Kč	8,87 Kč	FLAT CHIP	NOVÁ
SMD Rezistor R0805 4k7 0.1% YAGEO	12,00 Kč	8,87 Kč	FLAT CHIP	ODPÁJET
Varistor SIOV-CN1812K60G	19,00 Kč	8,87 Kč	FLAT CHIP	ODPÁJET
Mikrokontrolér ATmega64-16AU TQFP64 ATMEL	147,00 Kč	23,66 Kč	TQFP	ODPÁJET

8.5 Vyhodnocení ekonomické části

Z tabulky pro vyhodnocení, zda součástku odpájet a případně očistit nebo použít nový kus, můžeme vidět, že pro 7 součástek z 14 je výhodnější použít druhý způsob. Nejvyšším nákladem na opravu je finanční ohodnocení zaměstnance. To se v našem případě pohybuje v rozmezí od 8 833,33 Kč do 22 083 Kč za odpájení a očištění 1000 součástek. Naopak téměř zanedbatelným nákladem jsou náklady na elektřinu. Ty jsou řádově nižší oproti předchozímu nákladu a činí maximálně necelých 60 Kč pro 1000 kusů. Pokud je součástku potřeba čistit, náklad na tavidlo dosahuje hodnoty 1516,67 Kč pro 1000 kusů.

Náklady na výměnu jedné součástky se tedy liší díky rozdílné době potřebné k jejich odpájení a očištění. Nejkratší doba je potřeba u SMD rezistorů či kondenzátorů, které dosahují malých rozměrů, tím se rychleji prohřejí a zároveň není potřeba je čistit. Nákladnější je výměna mikrokontrolerů, komparátorů nebo programovatelných timerů, jelikož trvá delší čas je prohřát a také je nutné očistit vývody součástek. Doba potřebná pro čištění těchto součástek je delší než očištění tranzistorů. To je způsobeno tím, že tyto součástky mají více vývodů.

Můžeme říct, že náklad na výměnu jednoho kusu přímo odpovídá typu pouzdra dané součástky. Nejnižší náklad je u pouzdra typu flat chip. Vyšší je například u pouzdra typu SOP, PLCC či TQFP.

Pro každé pouzdro můžeme tedy stanovit mezní cenu součástky. Pokud bude cena opravy nižší než tato hodnota, vyplatí se opravovat. V případě, že by cena opravy byla vyšší než cena nové součástky, je výhodnější koupit součástku novou.

Mezní hodnoty pro použitá pouzdra:

- Pro SOP činí mezní hodnota 23,66 Kč
- Pro flat chip činí mezní hodnota 8,87 Kč
- Pro SOT činí mezní hodnota 14,80 Kč
- Pro PLCC činí mezní hodnota 23,66 Kč
- Pro MSOP činí mezní hodnota 14,80 Kč
- Pro SMA činí mezní hodnota 8,87 Kč
- Pro TQFP činí mezní hodnota 23,66 Kč

9. Závěr

V mé práci jsem se zabýval vlivem působení tepla na prokovy při pájení přetavením. V úvodu práce jsem nejprve čtenáře seznámil s deskami plošných spojů, používanými materiály na jejich výrobu, technologiemi výroby DPS, typy pouzder pro povrchovou montáž a přiblížil jim pájení přetavením spolu s chybami, které při pájení mohou vzniknout. Následně jsem zpracoval výsledky z praktické části a zhodnotil proces znovupoužití součástek z poškozené desky po ekonomické stránce.

V teoretické části jsem podrobně popsal desky plošného spoje, jejich dělení a části. Přiblížil jsem čtenářům také subtraktivní i aditivní metodu výroby DPS a technologii pájení přetavením společně s chybami, které při tomto ději mohou nastat. Zmínil jsem i různé druhy pouzder pro technologii SMT.

V praktické části jsem popsal pracoviště, na kterém byla problematika prokovů zkoumána, společně s popisem všech použitých zařízení. Také jsem vyhodnotil naměřená data. Lze vidět, že působení tepla při pájení přetavením má na funkčnost prokovu vliv. U malé tloušťky prokovů došlo k jejich nefunkčnosti po šestém zahřátí.

Při typické sériové montáži je však deska zahřáta na teplotu potřebnou pro přetavení pájky nejvýše dvakrát. Při pájení přetavením tedy ke zničení prokovu nedojde. Pokud však deska bude používána na místech s vysokou teplotou, nesmíme tento jev opomenout. V takovém případě nelze používat malé tloušťky prokovů.

V ekonomické části jsem zjistil, že při rozhodování zda součástku odpájet či použít novou, hraje nejdůležitější roli typ pouzdra a cena součástky. Pro mnou vybrané typy pouzder jsem stanovil mezní cenu opravy, do které je ještě ekonomicky výhodné provádět proces odpájení a očištění.

10. Zdroje

- [1] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 9788001023921;8001023923 ;
- [2] ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2010. ISBN 8073002663;9788073002664 ;
- [3] MACH, Pavel. Pájení [online]. [cit. 2017-10-13]. Dostupné z:
https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/44479/mod_resource/content/1/P%C3%A1j%C3%AD.pdf
- [4] DUŠEK, Karel. Pájení Úvod 1 [online]. [cit. 2017-10-13]. Dostupné z:
https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/53549/mod_resource/content/1/pajeni_uvod1.pdf
- [5] MACH, Pavel. Postup při výrobě plošných spojů [online]. [cit. 2017-10-17]. Dostupné z:
https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34497/mod_resource/content/1/Vyroba_plosnych_spoju.pdf
- [6] MACH, Pavel. Základní technologie procesu rapid (fast) prototyping [online]. [cit. 2017-10-20]. Dostupné z:
https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/68267/mod_resource/content/2/Rapid_prototyping_II_principy.pdf
- [7] MACH, Pavel. Fotolitografie 2 [online]. [cit. 2017-10-20]. Dostupné z:
https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/68229/mod_resource/content/1/Fotolitografie2.pdf
- [8] RŮŽIČKA, Jaroslav. Postup malosériové výroby DPS s prokovenými otvory [online]. [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:3422/postup-maloseriove-vyroby-dps-s-prokovenymi-otvory>
- [9] KOBLÍŽEK, Vilém. Měkké pájení v elektronice [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:
http://martin2.feld.cvut.cz/~koblizek/X13TEP_soubory/uloha_2.pdf
- [10] DURST, Pavel. Pracoviště pro testování růstu dendritů. Praha, 2017. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [11] DUŠEK, Karel. Pájení Úvod 2 [online]. [cit. 2017-11-15]. Dostupné z:
https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/53549/mod_resource/content/1/pajeni_uvod2.pdf
- [12] MACH, Pavel. Bezolovnaté pájení v elektrotechnice [online]. [cit. 2017-11-23]. Dostupné z:
https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34501/mod_resource/content/2/Bezolovnate_pajeni_v_elektrotechnice.pdf

- [13] DUŠEK, Karel. Soldering and solder joints in electronics. Praha, 2016. Habilitační práce. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie.
- [14] Mistral 260 Konvektions Reflowen [online]. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <https://www.paggen.de/produkte/reflow-ofen-und-loeten/mistral-260-konvektions-reflowofen/>
- [15] Lutron TM-914C [online]. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://www.siliconinstrument.com.sg/pdf/Lutron/TM-914.pdf>
- [16] Hewlett Packard 4263A [online]. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: http://www.ezurentals.com/Product/Model.Photo-Agilent_4263A.aspx
- [17] Český statistický úřad. Průměrné mzdy – 4. čtvrtletí 2017 [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/ci/prumerne-mzdy-4-ctvrtleti-2017>
- [18] GM electronic, spol. s.r.o. [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/gm-electronic-spol-s-r-o>
- [19] Horkovzdušná stanice SOLOMON SR-979 [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/horkovzdušna-stanice-solomon-sr-979#product-detail>
- [20] Pájecí stanice DIAMETRAL HBT – 1050 [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/pajeci-stanice-diametral-hbt-1050#product-detail>
- [21] Gelové tavidlo ELCHEMCO S-FUTURE JELLY [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: https://www.gsmcentrum.cz/gelove-tavidlo-elchemco-s-future-rework-jelly-30-g?gclid=Cj0KCQjwuMrXBRC_ARIsALWZrIhjdOHpOQDg7RJ3ktsa2WpYNqxi6pcxMqwqTXZKBwrIhzsk1MxDmK8aAtbCEALw_wcB
- [22] Aktuální cena za 1 kWh [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/>
- [23] ŠANDERA, Josef. Součástky pro povrchovou montáž, manipulace [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~sander/soucastky/souSMDmax12.pdf>
- [24] Wikipedie. SMT [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/SMT>
- [25] Toshiba announces new BGA SSDs Using 3D TLC NAND SMT [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.anandtech.com/show/10546/toshiba-announces-new-bga-ssds-using-3d-tlc-nand>

11. Seznam obrázků

Obrázek 1. Vývoj hustoty plošných spojů [1]	9
Obrázek 2. Znázornění prokovů na DPS [4]	10
Obrázek 3. Složení vícevrstvé desky plošných spojů [4]	11
Obrázek 4. Frézování měděné fólie na jádru z FR4 [6]	13
Obrázek 5. Aditivní proces [1]	14
Obrázek 6. Příklad optické značky pro osazovací automaty	16
Obrázek 7. Příklad teplotního profilu [11]	16
Obrázek 8. Příklad nesmáčivosti na DPS [10]	17
Obrázek 9. Příklad odsmáčení DPS [10]	17
Obrázek 10. Příklad prohnutí pouzdra [11]	18
Obrázek 11. Ukázka trhliny [11]	18
Obrázek 12. Kuličky pájky mimo určené místo [10]	18
Obrázek 13. Tombstoning [10]	19
Obrázek 14. Makrovoidy [11]	19
Obrázek 15. Růst whiskerů [11]	20
Obrázek 16 Různé typy vývodů součástek [23]	20
Obrázek 17 Pouzdro typu MELF [23]	21
Obrázek 18 Různé typy pokovení strany pouzdra flat chip [23]	21
Obrázek 19 Pouzdro typu SMA [24]	21
Obrázek 20 Pouzdro typu SOP [1]	22
Obrázek 21 Pouzdro typu QFP [1]	22
Obrázek 22 Pouzdro typu PLCC [1]	22
Obrázek 23 Pouzdro typu BGA [25]	22
Obrázek 24. Místa pro měření odporu prokovů	23

Obrázek 25. Deska plošného spoje	23
Obrázek 26. Horkovzdušná pec Mistral 260 [14]	24
Obrázek 27. Ohmmetr HP 4263A [16]	24
Obrázek 28. Profilometr	24
Obrázek 29. Termočlánek [15]	25
Obrázek 30. Naměřený první teplotní profil	25
Obrázek 31. Závislost odporu na počtu přehřátí pro první teplotní profil	25
Obrázek 32. Naměřený druhý teplotní profil	25
Obrázek 33. Závislost odporu na počtu přehřátí pro druhý teplotní profil	25