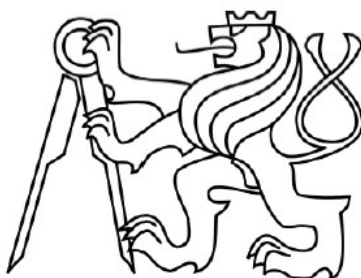


# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE



## Diplomová práce

Studie vlastností desek plošných spojů

Study of Printed Circuit Board Properties

Autor práce: Dominik Baudyš

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

Studijní obor: Elektronika, energetika a management – Technologické systémy

Akademický rok: 2019/2020

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Baudyš** Jméno: **Dominik** Osobní číslo: **456972**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Technologické systémy**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Studie vlastností desek plošných spojů**

Název diplomové práce anglicky:

**Study of Printed Circuit Board Properties**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s materiály a výrobou desek plošných spojů.
- 2) U vybraných substrátů proveďte analýzu s ohledem na materiálové a procesní parametry.
- 3) Výsledky analýz vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice 2005
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [3] Alena Pietriková, Juraj Durišin, and Pavel Mach, Diagnostika a optimalizácia pou žitia ekologických materiálů pre vodivé spájanie v elektronike, 1. vydanie. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **11.02.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **22.05.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

**Prohlášení:**

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

V Praze dne .....

**Dominik Baudyš**

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za jeho cenné rady, zkušenosti a zejména jeho drahocenný čas, který mi věnoval během konzultací či pomoci při měření.

Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu, kterou mi poskytovala během celé doby mého studia.

**Anotace:**

Cílem této diplomové práce je přiblížit čtenářům problematiku z oblasti desek plošných spojů a procesu pájení.

Teoretická část je zaměřena na proces pájení, různé technologie pájení, vlastnosti substrátů a chyby vznikající během této činnosti či jejich vliv na funkci desky.

Praktická část zkoumá teplotní roztažnost desky v ose „Z“. Společně s popisem měření použitými přístroji a naměřenými daty je zde též i vyhodnocení výsledků.

**Klíčová slova:**

Deska plošných spojů, pájení přetavením, chyby při pájení, teplotní roztažnost v ose Z

**Annotation:**

A goal of this diploma thesis is to introduce to the readers problematics from printed circuit boards area and the process of soldering.

The theoretical part is focused on the process of soldering, technologies of soldering, substrate properties and defects that can develop during this action.

The practical part investigate the thermal expansion in Z axis. The description of the measurement, measured data and its evaluation is also included.

**Key words:**

Printed circuit board, reflow soldering, defects on printed circuit board, thermal expansion in Z axis

# Obsah

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 1. Úvod.....                               | 10 |
| 2. Deska plošného spoje .....              | 11 |
| 2.1 Struktura DPS .....                    | 12 |
| 2.2 Vlastnosti DPS .....                   | 13 |
| 2.3 Materiály používané pro DPS.....       | 16 |
| 2.3.1 Fenolické substráty .....            | 17 |
| 2.3.2 Epoxidové substráty.....             | 18 |
| 2.3.3 Kompozitové substráty .....          | 18 |
| 2.3.4 Substráty pro vyšší výkony.....      | 19 |
| 2.3.5 Keramické a skleněné substráty ..... | 20 |
| 3. Proces pájení.....                      | 21 |
| 3.1 Ruční pájení.....                      | 22 |
| 3.2 Strojní pájení .....                   | 22 |
| 3.2.1 Pájení vlnou.....                    | 23 |
| 3.2.2 Pájení přetavením.....               | 24 |
| 3.3 Typy pájecích slitin .....             | 27 |
| 3.3.1 Sn63Pb37 .....                       | 28 |
| 3.3.2 SAC pájky.....                       | 28 |
| 3.3.3 SC pájky .....                       | 28 |
| 3.3.4 SA pájky.....                        | 28 |
| 3.3.5 SB pájky .....                       | 28 |
| 3.4 Typy tavidel a jejich funkce.....      | 29 |
| 3.5 Typy povrchových úprav .....           | 30 |

|        |                                  |    |
|--------|----------------------------------|----|
| 3.5.1  | HAL .....                        | 31 |
| 3.5.2  | ENIG .....                       | 31 |
| 3.5.3  | OSP .....                        | 31 |
| 3.5.4  | Imerzní Sn.....                  | 32 |
| 3.6    | Výrobní vady .....               | 32 |
| 3.6.1  | Nesmáčivost.....                 | 32 |
| 3.6.2  | Odsmásčení .....                 | 33 |
| 3.6.3  | Kuličky pájky.....               | 34 |
| 3.6.4  | Nedostatečné přetavení .....     | 34 |
| 3.6.5  | Špatné umístění součástky.....   | 34 |
| 3.6.6  | Thombstoning .....               | 35 |
| 3.6.7  | Popcorn efekt.....               | 35 |
| 3.6.8  | Můstky.....                      | 36 |
| 3.6.9  | Whiskery .....                   | 36 |
| 3.6.10 | Voidy .....                      | 37 |
| 3.6.11 | Prohnutí pouzdra .....           | 37 |
| 3.6.12 | Delaminace DPS .....             | 38 |
| 3.6.13 | Prasknutí prokovu .....          | 38 |
| 3.6.14 | Pad cratering .....              | 38 |
| 3.7    | Hodnocení kvality.....           | 39 |
| 3.7.1  | Optické kontrolní metody .....   | 39 |
| 3.7.2  | Elektrické kontrolní metody..... | 43 |
| 4.     | Praktická část .....             | 45 |
| 4.1    | Popis použitých zařízení.....    | 45 |
| 4.1.1  | Teplotní profiloměr .....        | 45 |

|       |                                          |    |
|-------|------------------------------------------|----|
| 4.1.2 | Horkovzdušná pec.....                    | 45 |
| 4.1.3 | Termomechanický analyzátor Q400 TMA..... | 46 |
| 4.2   | Vzorky a jejich popis.....               | 47 |
| 4.3   | Stručný popis měření .....               | 49 |
| 4.4   | Naměřené výsledky.....                   | 50 |
| 4.5   | Porovnání výsledků .....                 | 58 |
| 4.6   | Zhodnocení praktické části .....         | 61 |
| 5.    | Závěr.....                               | 63 |
| 6.    | Seznam obrázků .....                     | 65 |
| 7.    | Seznam tabulek.....                      | 67 |
| 8.    | Seznam rovnic .....                      | 67 |
| 9.    | Seznam grafů.....                        | 67 |
| 10.   | Seznam použité literatury .....          | 68 |



## **Seznam použitých zkratk**

**DPS – deska plošného spoje**

**RoHS – Restriction of Hazardous Substances – směrnice Evropského parlamentu o omezení užívání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních**

**FR4 – flame retardant – tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí**

**PTFE – polytetrafluorethylen**

**SMD – surface mount devices – součástky pro povrchovou montáž**

**SMT – surface mount technology – technologie povrchové montáže**

**THT – through hole technology – technologie montáže součástek s vývody**

**THD – through hole devices – součástky pro technologii THT**

**CEM1 – kompozitní laminát**

**BT-epoxid bismaleimid-trizin**

**VOC – volatile organic compound – těkavé organické sloučeniny**

**BGA – ball grid array – pouzdro pro SMT**

**PCB – printed circuit board – deska plošného spoje**

**CT – computer tomography – počítačová tomografie**

**RTG – rentgen**

# 1. Úvod

Elektrotechnika se v dnešní době ubírá kupředu mílovými kroky. Nové objevy spatřují světlo světa mnohem častěji, než tomu bylo dříve. V mnohých odvětvích se jde do stále větší a větší hloubky a společně s tímto vývojem se setkáváme i s novými chybami.

Jedním z největších trendů je postupná automatizace výroby a miniaturizace součástek. Desky plošných spojů jsou tímto značně ovlivněny. Desky se vyrábí několikanásobně vyšším počtem součástek, než tomu bylo v minulosti.

Veliký důraz se klade nyní i na ekologii. Směrnice RoHS (Restriction of Hazardous Substances) nám zakazuje užívat některé materiály v běžných aplikacích. Jednou z těchto látek je olovo, které se dříve používalo jako součást pájecích past. Olovnaté pájky byly nahrazeny bezolovnatými a tato změna přinesla jeden zásadní problém. Tím je vyšší teplota přetavení.

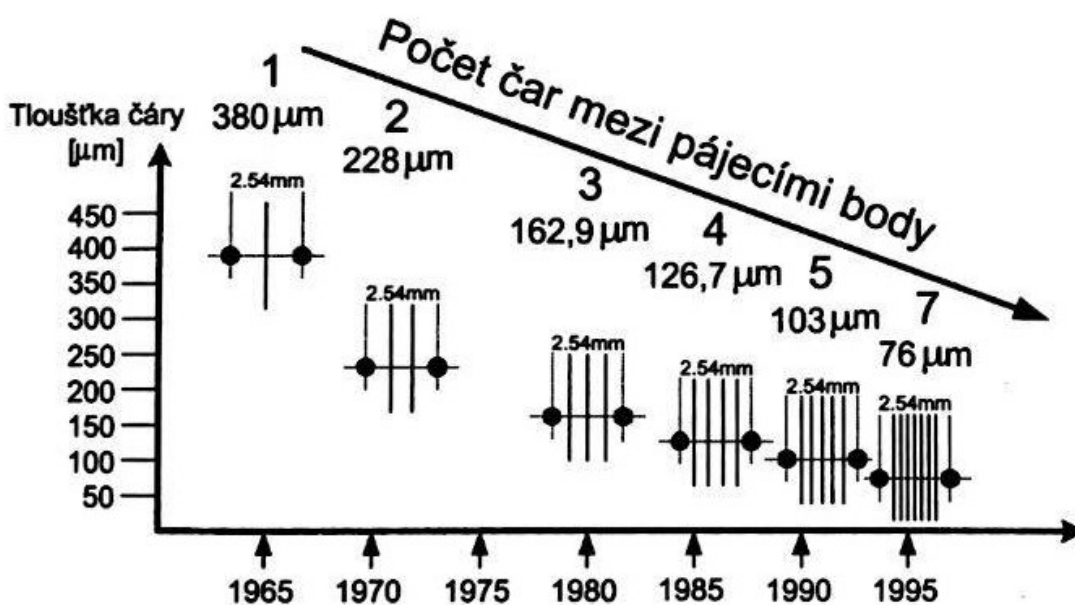
Vliv tohoto nárůstu teploty souvisí zejména s teplotní roztažností. S vyšší teplotou se i deska samotná roztahuje, a to může způsobit následné chyby či nefunkčnost celé desky plošného spoje.

V této práci budu zkoumat vliv teploty na desku plošného spoje v závislosti na jejím složení a použitém materiálu. Praktická část byla původně zamýšlena ve větším rozsahu. Vzhledem k restrikcím a pozastavení prezenční výuky způsobenou probíhající epidemií COVID-19 musela být zkrácena a měření v laboratoři neproběhla v původně plánovaném rozsahu.

# Teoretická část

## 2. Deska plošného spoje

Plošný spoj je základ téměř každého elektronického zařízení. Jeho historie sahá již do období před druhou světovou válkou. Od té doby však prošel ohromným vývojem a dnešní desky plošných spojů bychom s těmi původními mohli jen těžko porovnávat. Od původní jednovrstvé desky se přešlo na spoj dvouvrstvý a dále až na šedesátčtyřvrstvý. Počet vrstev se však opět začal snižovat s příchodem integrovaných obvodů. Nejvýznamnější změnu lze pozorovat v oblasti miniaturizace. Pokud vezmeme desky se stejnou funkcí a stejnými elektrickými parametry, tak dnes vyrobená deska bude nabývat mnohem menších rozměrů jak desky samotné, tak i součástek na desce umístěných. Stoupá také hustota plošných spojů. Jej vývoj můžeme vidět na následujícím obrázku. [1]



Obr. 1 - Vývoj hustoty plošných spojů [1]

DPS má několik funkcí. Součástkám, které jsou na ní upevněné, dává mechanickou podporu. Pomocí vodičů vyrobených na nosné desce zajišťuje elektrické propojení mezi jednotlivými součástkami. Dále zajišťuje označení jednotlivých součástek a jejich vývodů.

Hlavním faktorem častého používání plošných desek je to, že se dají hromadně vyrábět. Výsledkem sériové výroby jsou spoje s nízkou cenou a vysokou spolehlivostí. Níže jsou uvedeny další výhody, díky kterým desky používáme:

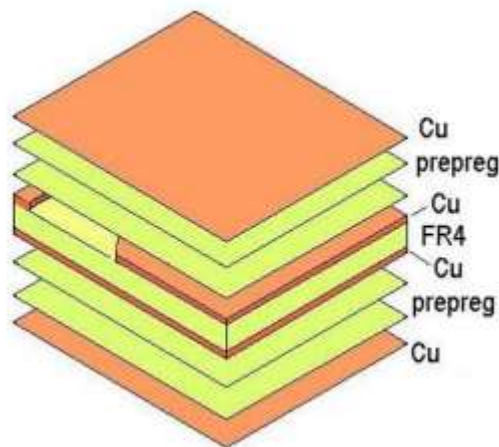
- automatizovatelnost výroby
- snadná opravitelnost (ve většině případů)
- jasně dané rozmístění a poloha součástek
- téměř totožné parametry vypočtených a změřených elektrických parametrů
- malá hmotnost [1]

Mezi hlavní nevýhody patří:

- malá odolnost proti vibracím a rázům
- návrh se řídí složitými pravidly
- u vyspělejších technologií vysoké investiční náklady [1]

## 2.1 Struktura DPS

Struktura je závislá na počtu vrstev, vždy se ale jedná o kombinaci jádra, vodivé vrstvy a případně pre-pregu. Jednovrstvý spoj je jádro, které má na jedné straně vyrobený vodivý profil pomocí měděné fólie. Dvouvrstvý spoj se od předchozího liší tím, že vodivý profil je utvořen na obou stranách. Vícevrstvé jsou tvořeny vrstvením pre-pregů (skelná tkanina společně s pryskyřicí) a měděné fólie. K vzájemnému elektrickému propojení jednotlivých vrstev slouží prokov (pokovený otvor). Složení vícevrstvé desky lze vidět na obrázku níže. [2]



**Obr. 2 - Složení vícevrstvé desky plošných spojů [2]**

Jádro, jak je vidět z předchozího obrázku, zaujímá pozici ve středu desky. Použitý materiál a jeho tloušťka značně ovlivňují mechanické vlastnosti. Tloušťka materiálu se nejčastěji pohybuje v rozmezí 0,2–3,2 mm. V některých případech nemusí být u desky použité pouze jedno jádro. Největší důraz se u

volby materiálu klade na vysokou vnitřní a povrchovou rezistivitu (pro některé aplikace např.  $10^{15} \Omega\text{cm}$ ). Elektrická pevnost materiálu nehraje zpravidla příliš velkou roli, jelikož napětí na deskách bývají malá. [1] [2]

### Pre-preg

Prepregy, v některých případech nazývány také jako lepící listy, jsou skelná vlákna impregnována částečně zpolymerizovanou pryskyřicí. Úroveň, do jaké je pryskyřice zpolymerizována, je volena tak, aby list nebyl lepkavý. Při zahřátí musí znovu dojít ke změknutí. Poté dochází k vytvrzení za předem stanoveného tlaku a teploty.

Parametry prepregů jsou různé v závislosti na typu laminátu. Liší se obsahem a tekutostí pryskyřice, či časem želatinace. Tekutost pryskyřice přispívá k lepším výsledkům během procesu odplynění a získáváme tak laminát bez pórů a dutin. [1]

### Vodivá fólie

Vodivá fólie zajišťuje vodivé propojení jednotlivých součástek na desce plošného spoje. Nejčastěji se můžeme setkat s fóliemi vyrobenými z Cu. Tato měď dosahuje čistoty 99,8 % a byla získána elektrolýzou. Je nanášena na jádro za vysokého tlaku a teploty. Pokud chceme mít více vrstev vodivých motivů, musíme jednotlivé Cu folie oddělit pomocí prepregů. Oxidace vnitřních vrstev mědi přispívá k bezpečnějšímu spojení mezi Cu folií a prepregy. Tloušťka vrstvy závisí na jejím umístění. U vnitřních vrstev činí tloušťka 35  $\mu\text{m}$ , u vnějších 17,5  $\mu\text{m}$ . Tlustší vrstvy lze použít pro zlepšení chlazení nebo v částech sloužících pro napájení. [1] [2]

## 2.2 Vlastnosti DPS

Hotová deska bez osazených součástek, někdy též substrát, je základní stavební prvek. Jeho účelem je nést součástky, elektricky je propojit a také zajistit odvod tepla. Jsou na něj kladeny vysoké nároky jak z hlediska elektrického, mechanického, tak i tepelného. [1]

### Elektrické vlastnosti

Vnitřní a povrchová rezistivita jsou jedněmi z nejdůležitějších vlastností substrátu. Jak již bylo uvedeno, nově na trh uvedené elektronické součástky potřebují stále vyšší požadavky, a tak hodnoty  $10^{15} \Omega$  nejsou ničím výjimečným.

Dalšími důležitými ukazateli jsou ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  a relativní permitivita  $\epsilon_r$ . Jejich parametry jsou důležité zejména při aplikacích s vyššími frekvencemi.

Co se týče vodivé struktury, je požadována co nejnižší rezistivita, jelikož velmi malé rozměry plošných vodičů musí, i přes svoji velikost, zaručit kvalitní spojení mezi jednotlivými součástkami zdroji s minimálním zkreslením. [1]

### **Tepelné vlastnosti**

Aktivní i pasivní součástky jsou citlivé na provozní teplotu. Jejich výsledné parametry (a tedy i funkce samotná) se s teplotou mění. Z tohoto důvodu je tedy účinné chlazení (zejména u hustě osazených desek součástkami SMD – surface mount devices) nutností. Vyšší pozornost z pohledu chlazení je věnována SMT, kde je oproti THT stejný výkon realizován na mnohem menší ploše a zároveň je tepelný odpor vodivých cest vyšší.

Musí být tedy zajištěn odvod tepla. Ten je realizován kombinací vedení, proudění a sálání tepla.

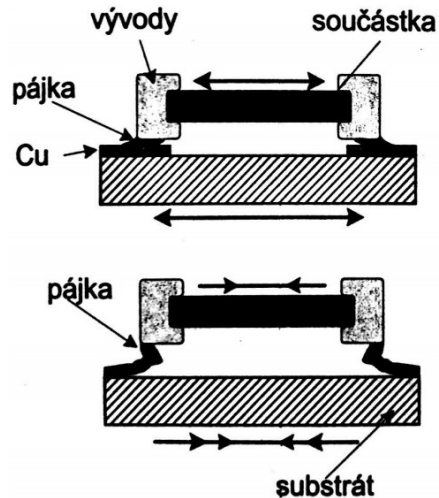
Odvod tepla vedením, kdy se teplo šíří trojdimenzionálně z místa s teplotou vyšší do míst s teplotou nižší, se řídí zákony, které jsou podobné zákonům popisující vedení elektrické energie. Tento způsob je důležitým pomocníkem zejména u jednodušších systémů.

Odvod tepla prouděním je realizován nejčastěji externě. Chladícím médiem bývá vzduch. V některých aplikacích je vzduch čištěn pomocí filtrů, aby deska nebyla znečištěna prachem či chemickými nečistotami. [1]

### **Mechanické vlastnosti**

Vzhledem k tomu, že v dnešní době využíváme velmi husté a jemné motivy propojení, musí substráty vykazovat velmi dobré mechanické vlastnosti. Těmi je například pevnost, rovinnost povrchu, nehořlavost, stálost rozměrů, odolnost proti provozním a výrobním prostředím atd.

Jednou z klíčových vlastností je tepelná roztažnost, potažmo roztažnost substrátu a součástek na něm umístěných. Pokud budeme uvažovat vývodové součástky, není situace tak závažná, jelikož pružné vývody jsou schopny eliminovat diferencí v teplotních roztažnostech celkem snadno. K vyrovnání této rozdílnosti pomáhá i poměrně silná vrstva pájky.



**Obr. 3 - Působení roztažnosti [1]**

Jak můžeme vidět na obrázku výše, je daleko obtížnější zvládat rozdílnou teplotní roztažnost u povrchové montáže, jelikož v tomto případě je kontakt mezi součástkou a substrátem velmi malý a minimální je i vrstva vodivého spoje.

I při pokojové teplotě je systém vystaven stresu z toho důvodu, že substrát i součástka jsou mnohem tvrdší než pájka, na které se tak projeví působení pnutí.

Chladnutím různě teplých součástek, substrátu a pájky vzniká napětí podle jejich vzájemného poměru koeficientů teplotní roztažnosti. Jako příklad si lze uvést keramický kondenzátor s koeficientem teplotní roztažnosti okolo 6 ppm/K a skloepoxidového substrátu s koeficientem teplotní roztažnosti cca 16 ppm/K. Při procesu chladnutí se substrát smršťuje o  $16 \cdot 10^{-6}$  na každý kelvin, kdežto součástka pouze  $6 \cdot 10^{-6}$  na kelvin. Tím pádem je součástka stlačována a substrát napínán. Pájka je pak namáhána stříhem, smykem a tahem a dochází k její deformaci, díky které se snižuje pnutí mezi součástkou a substrátem. [1]

Máme tři možnosti, kterými lze snížit rozdíly roztažnosti:

- Zvolit materiály, které mají podobný koeficient tepelné roztažnosti
- Zvolit spoj se schopností pohlcení rozměrových diferencí
- Zvolit substrát se schopností pohltit rozměrové diference [1]

## 2.3 Materiály používané pro DPS

Vzhledem k tomu, že substráty používáme již pěknou řádku let a tento obor se neustále vyvíjí, máme k dispozici velice pestrou paletu, co se používaných materiálů týče. Přesto se však některé materiály staly klasickými a jsou to právě ty, které dosahují vysoké spolehlivosti parametrů a zároveň nízké pořizovací ceny. Skladba substrátu je následující – jako základní materiál je nejčastěji používáno dielektrikum, skládající se z pryskyřičného základu a je vyztuženo vrstvami výztuže. Toto dielektrikum je také plátováno vodivou fólií, a to buď pouze z jedné nebo obou stran. [1]

| Výztuž                   | Dielektrikum        | Vodič            |
|--------------------------|---------------------|------------------|
| bez výztuže              | epoxid              | měď              |
| skelná tkanina           | fenol               | nikl             |
| bavlněný papír           | bismaleimid-triazin | měď/invar/měď    |
| buničitý papír           | modifikovaný epoxid | měď/molybden/měď |
| netkané skelné vlákno    | polyimid            | nikl/měď         |
| křemenné sklo            | kyanatan esteru     |                  |
| aramidová tkanina        | PTFE                |                  |
| netkané aramidové vlákno | polyester           |                  |
| lehčená PTFE tkanina     | melamin             |                  |
| kevlarové vlákno         |                     |                  |
| skelná rohož             |                     |                  |

**Obr. 4 - Přehled složek základního materiálu [1]**

Pro výztuže se nejčastěji používá skelné tkaniny či buničitého papíru. Pro impregnaci skla nebo papíru se užívá epoxidová pryskyřice, pro impregnaci papíru je užívána fenolická pryskyřice. V novějších aplikacích se vyskytuje též polyimid a BT – epoxid. Vodivá fólie je v drtivé většině případů elektrolytická měď a tvářená žíhaná měď. Velké množství používaných materiálů je dané rozličnými požadavky na chemické, mechanické či elektrické vlastnosti. [1]

Veškeré výše uvedené pryskyřičné systémy (s výjimkou PTFE), které používáme pro plošné spoje jsou termosety – tedy látky, které po tepelném vytvrzení již nelze novým zahřátím znovu uvést do tvárného stavu, jelikož se celý makroskopický výrobek změní v jedinou molekulu.

Při zahřátí dochází při určité teplotě k tomu, že polymer přejde ze skelné fáze do téměř elastické formy. Tuto teplotu nazýváme teplota skelného přechodu ( $T_g$ ) a až do tohoto bodu je průběh změny koeficientu teplotní roztažnosti v závislosti na vzrůstající teplotě lineární. Po překonání teploty skelného přechodu se mění průběh v exponenciální. Tohoto jevu si lze všimnout v grafech zpracovaných v praktické části. Pro vícevrstvé aplikace a vyšší požadavky na spolehlivost se vyžaduje vyšší teplota skelného



přechodu, jelikož při pájecí teplotě je roztažnost vodičů a pokovených otvorů 10x menší než roztažnost základního materiálu. [1] [3] [5]

| <b>Pryskyřice</b> | <b>Výztuž</b> |                | <b>Označení</b>                    |
|-------------------|---------------|----------------|------------------------------------|
| <b>fenol</b>      | <b>papír</b>  | <b>listy</b>   | <b>FR-2,X,XP,XX,XXP,XXX,XPC,..</b> |
|                   | <b>bavlna</b> | <b>tkanina</b> | <b>C,CE,L,LE</b>                   |
|                   | <b>asbest</b> | <b>listy</b>   | <b>A</b>                           |
|                   |               | <b>tkanina</b> | <b>AA</b>                          |
|                   | <b>sklo</b>   | <b>vlákno</b>  | <b>G-2</b>                         |
|                   |               | <b>tkanina</b> | <b>G-3</b>                         |
| <b>nylon</b>      | <b>vlákna</b> | <b>N-1</b>     |                                    |
|                   | <b>-</b>      | <b>-</b>       | <b>ES-1, ES-3</b>                  |
| <b>melamin</b>    | <b>sklo</b>   | <b>tkanina</b> | <b>G-5, G-9</b>                    |
|                   | <b>-</b>      | <b>-</b>       | <b>-</b>                           |
| <b>epoxid</b>     | <b>papír</b>  | <b>listy</b>   | <b>FR-3</b>                        |
|                   | <b>sklo</b>   | <b>tkanina</b> | <b>G-10,G-11,FR-4,FR-5</b>         |
| <b>polyester</b>  | <b>sklo</b>   | <b>rohož</b>   | <b>FR-6,GPO-1,GPO-2</b>            |
| <b>silikon</b>    | <b>sklo</b>   | <b>rohož</b>   | <b>G-7</b>                         |

**Obr. 5 - Některé typy tuhých laminátů [1]**

Ve výše uvedené tabule můžeme vidět některé typy tuhých laminátů. Z materiálového hlediska lze substráty rozdělit do následujících skupin. Substráty organické, do kterých lze řadit fenolické či epoxidové substráty, dále substráty kompozitové, substráty pro vyšší výkony (polyamidové, BT – epoxidové, kyanátesterové či polytetrafluorethylenové), keramické či skleněné.

### 2.3.1 Fenolické substráty

Fenolické substráty jsou hojně využívány z důvodu jejich nízké ceny a dobrých elektrických vlastností, krom odolnosti proti elektrickému oblouku. Nejčastěji se vyskytují vyztužené papírem a s obsahem pryskyřice 35 %, 45 % a 58 % pro typy X, XX a XXX. Lamináty pod označením XXXP a XXXPC obsahují též flexibilizátory.

Při výrobě je papír kontinuálně impregnován v horizontální poloze, ve které je udržován vzduchovým polštářem. Poté je za tepla lisována vrstva takto impregnovaných listů a následně dochází k vytvrzení a plátování měděnou fólií. Desky se vyrábí v rozměru 1x1m. Drobnou nevýhodou je navlhavost tohoto materiálu, a proto se na tento nedostatek musí brát zřetel při výrobě a používání. [1] [5]

### 2.3.2 Epoxidové substráty

Pro výrobu epoxidových substrátů se používá etylenchlorhydrin a bisfenol A. Tyto materiály jsou mnohem dražší nežli fenolický materiál, zároveň však mají mnohem lepší vlastnosti. Co se týče skloepoxidových materiálů, ty se staly nejrozšířenějšími a nejpoužívanějšími. Typ FR-4 se dá označit za světový standard. Od zavedení dochází k jejich neustálému zlepšování a zavedení nepájivé masky umožnilo vyšší zhuštění vodivých motivů spolu s dokonalejší ochranou před vlivy provozního prostředí.

Výsledky výzkumů potvrdily přiměřenost systému FR-4 s teplotou skelného přechodu  $T_g \geq 150$  °C potřebám současných aplikací a také požadavkům automobilového průmyslu. Díky užití v oblasti automotive výrazně stoupla výroba těchto desek. Redukce deformací základního materiálu, zejména ohýbání a kroucení, které způsobovalo poruchy v osazovacích automatech, přineslo též zlepšení.

Počet vrstev skelné tkaniny v laminátu společně s jejich tloušťkou ovlivňují výsledné vlastnosti. Těmi je například relativní permitivita a ztrátový činitel. Kvalitnější materiály se vyznačují vyšším počtem vrstev skelné tkaniny. Pro standartní laminát se používá tloušťka 1,5 mm a jsou osmivrstvé.

Při výrobě skloepoxidového dielektrika se skelná tkanina kontinuálně impregnuje v ponořovací nádobě pryskyřicí, poté je sušena ve vertikální poloze a následně kalibrována v lisovacích válcích na požadovanou tloušťku. Při procesu sušení je pryskyřice částečně vytvrzena tak, aby vzniklý materiál (prepreg) nebyl lepkavý a zároveň, aby byl při vlastní laminaci opět změkčitelný.

Během výroby samotného laminátu jsou na sebe vrstveny předem stanovené počty prepregů a separačních listů (ty oddělují jednotlivé desky od sebe) a vloží se do vyhřívacího lisu, kde jsou za stanoveného průběhu teploty a tlaku vytvrzovány. Takto můžeme v jedné várce vytvrdit 20 až 30 desek. Desky se obvykle vyrábí v rozměrech 1225 mm x 925 mm nebo 1225 mm x 1070 mm. Obdélníkový tvar je užíván z důvodu toho, aby se dal snadno určit směr osnovy či válcování papíru.

Hlavní výhody skloepoxidových laminátů je nižší navlhavost, dobré elektrické a mechanické vlastnosti a rozměrová stabilita. Co se týče nevýhod, nejvýznamnějšími je vyšší cena, možná delaminace a horší obrobiteľnosť. [1] [5]

### 2.3.3 Kompozitové substráty

Tyto substráty kombinují nejlepší vlastnosti substrátů na bázi skla a papíru. Nejvíce používaným a také nejlepším kompozitním laminátem je CEM-1, který se skládá z jádra (epoxidem impregnovaný celulósový papír), které je pokryto jednou vrstvou skloepoxidového prepregu z obou stran.

Díky nízké ceně papírového laminátu, vysoké rozměrové stabilitě, dobré děrovatelnosti a lepším elektrickým vlastnostem je často CEM-1 preferován před FR-4. Největšího využití se dostává v autorádiích či malých elektrických spotřebičích. Jednovrstvé aplikace jsou častější než oboustranné.

Dalším zástupcem kompozitních substrátů je materiál CEM-3, které má jádro z netkaných skelných vláken. Po obou stranách této skelné rohože je následně přidán skloepoxidový prepreg. Materiál je znám zejména v Japonsku, kde mnohdy nahrazuje FR-4. [1] [5]

**Tabulka 1 – Vlastnosti substrátů [1]**

| Vlastnosti                                     | XXXPC  | FR-4      | CEM-1     |
|------------------------------------------------|--------|-----------|-----------|
| Odolnost na pájecí lázni 250 °C, [s]           | 10     | 20        | 20        |
| Pevnost v loupání po pájecí lázni, [N/mm šíře] | 1,05   | 1,4       | 1,2       |
| Povrchová rezistivita, [ $\Omega$ ]            | $10^9$ | $10^{10}$ | $10^{10}$ |
| Vnitřní rezistivita, [ $\Omega$ cm]            | $10^9$ | $10^{12}$ | $10^{12}$ |
| Nasákavost vodou, [% váhy]                     | 0,75   | 0,25      | 0,30      |
| Elektrická pevnost, [kV]                       | 15     | 40        | 40        |
| Relativní permitivita, max. při 1 MHz, [1]     | 4,8    | 5,4       | 5,0       |
| Ztrátový činitel, při 1 MHz, [1]               | 0,04   | 0,035     | 0,04      |

Ve výše uvedené tabulce lze vidět srovnání substrátů, kde každý vzorek zastupuje jednu ze třech výše popsaných skupin. Materiál XXXPC ze skupiny substrátů fenolických, FR-4 epoxidových a CEM-1 kompozitových. Lze vyčíst, že poslední dva jmenované vzorky se příliš neliší ve svých vlastnostech a oba převyšují první materiál. Všechny mají téměř shodný ztrátový činitel při 1 MHz. Nejvíce nasakuje vodu materiál XXXPC, který je v tomto ohledu horší, téměř 3x oproti FR-4. To samé lze vysledovat i u elektrické pevnosti a odolnosti na pájecí lázni 250 °C, kde poslední dva materiály mají změřené hodnoty více než dvakrát vyšší. [1] [5]

#### 2.3.4 Substráty pro vyšší výkony

Parametry, které by měl mít substrát určený pro vyšší výkony, není vždy jasně dané, a tak vždy záleží na oblasti aplikace. V některých aplikacích je vyžadována odolnost proti vyšší provozní teplotě, jinde například nižší relativní permitivita. [4] [5]

### **Polyimidový substrát**

Tento materiál byl po dlouhou dobu jediná alternativa ke skloepoxidovému. Má vysokou teplotu skelného přechodu (260 °C a více). Vyšší hodnoty jsou již hraniční pro základní materiály a pro chemickou odolnost. Využití můžeme najít například v aplikacích pro letectví, kde vykazuje vysokou spolehlivost a odolnost v tepelných cyklech.

Polyimidové substráty mají několik generací. První musela být upravena, jelikož používané tvrdidlo obsahovalo karcinogenní látky. Nynější generace mají pevnější pryskyřičný systém a méně navlhají oproti svým předchůdcům.

### **BT – epoxidový substrát**

Přívlastek BT je odvozen z příměsi bismaleimid-trizin, která se míchá s epoxidem a vzniká tak pryskyřičný systém, který má  $T_g \geq 180$  °C. Tento systém se se svými vlastnostmi a cenou nachází někde mezi skloepoxidem a sklopolyimidem. Je to ideální materiál pro aplikace, kde jsou čipy testovány před montáží. Nabízí zároveň i optimální řešení pro aplikace v MHz rozsazích u spotřební elektroniky, kde není přijatelná vysoká cena skutečných mikrovlnných materiálů.

### **Kyanátesterový substrát**

Sklokyanátester dosahuje nízké relativní permitivity 3,5 u bohatě pryskyřicí sycených laminátů. Využívá se v rychlých obvodech se strmým náběhem signálu. Typická tloušťka materiálu má hodnotu 0,15 mm a je tvořena dvěma vrstvami skelné tkaniny. Širšímu využití brání omezená použitelnost a limitovaný výkon.

### **Polytetrafluorethylenový substrát**

Substráty z PTFE mají skelnou výztuž a využívají se zejména v aplikacích mikrovlnných (až do frekvencí dosahujících několika GHz). Jelikož mikrovlnné obvody ovlivňují kromě součástek také samotné součásti obvodů, řídí se návrh složitějšími pravidly a nároky na materiál jsou vyšší. [1] [5]

#### **2.3.5 Keramické a skleněné substráty**

Tento typ používáme pro zvláštní typy desek plošných spojů, kde se uplatní speciální vlastnosti keramiky. Pro obvody s nižšími výkony lze využít tenkovrstvé obvody nanesené na sklo. Jelikož sklo i keramika pochází z přírodních surovin a obsahují mnoho nečistot, klade se veliký důraz na čištění. Na jeho kvalitě pak závisí vlastnosti substrátů.

Pro výrobu keramického substrátu lze využít dva způsoby – válcování a lití.

Během procesu válcování je jemný prášek smíchán s přísadami a tato směs je vložena do zásobníku. Odtud je vytlačována mezi lisovací válce – ty upravují tloušťku a šířku na požadované hodnoty. Následně je tento pás suché keramiky stočen do role.

U procesu lití se jemný prášek opět smíchá s přísadami a vloží do zásobníku. Směs vytéká ze zásobníku přes stírací nůž (ten formuje tloušťku a šířku) na probíhající pás. Zde je hmota sušena při průchodu sušícím tunelem. Pás je opět navíjen do role.

Následuje dělení na požadované tvary a velikosti a poté proces spékání, kde keramika mění svou pevnost a strukturu.

Podle relativní permitivity lze rozdělit kvalitní elektronickou keramiku na dvě skupiny. Pokud je hodnota permitivity vyšší než 12, využívá se hlavně pro kondenzátorová dielektrika. Pokud je nižší než tato hodnota, využívá se jako substrát.

Mezi výhody lze uvést dobrou tepelnou vodivost, vyspělou technologii, širokou použitelnost a koeficient tepelné roztažnosti podobný keramickým součástkám. Co se týče nevýhod, nejvýznamnější jsou vyšší cena, velká relativní permitivita, omezená velikost, praskání po mechanickém a tepelném rázu a omezená možnost oprav. [1]

### 3. Proces pájení

V této kapitole lze nalézt informace o procesu pájení, samotných postupech a také nejpoužívanějších typech pájecích slitin, tavidel. Bude popsáno několik typů pájecích slitin a také, jaké chyby během tohoto procesu mohou nastat.

Obecně se pájení dá rozdělit dle použité teploty. Do teploty 450 °C hovoříme o měkkém pájení, které je využíváno v elektrotechnice. Při použití vyšší teploty je to tvrdé pájení, které je využíváno zejména při mechanickém spojování konstrukcí a v této práci se jím již nadále zabývat nebudu. [10] [11]

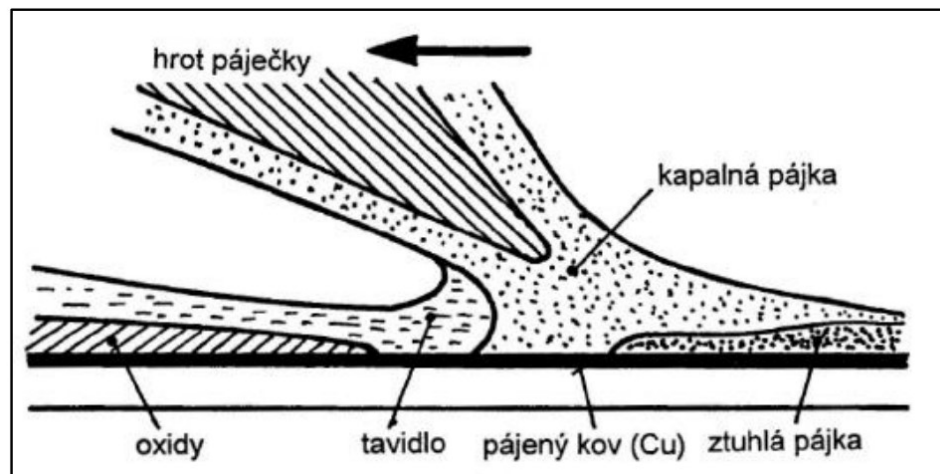
Jakožto každý proces, i pájení došlo za poslední řadu let podstatným vývojem. Díky automatizaci celý proces značně urychlil a zkvalitnil. Přesto níže uvedu i metody používané dříve, jelikož některé se používají ve speciálních případech dodnes.

### 3.1 Ruční pájení

Ruční pájení byla dříve nejvíce užívaná metoda pájení. Postupem času se však používala stále méně z důvodu menší rychlosti, nižší kvality a nepřesnosti oproti strojnímu pájení. V dnešní době se s touto metodou můžeme setkat při kusové výrobě prototypů či u oprav. V tomto typu pájení musíme brát v potaz lidský faktor, který do procesu zanáší chyby. Nedokážeme vždy zajistit stejné podmínky u jednotlivých spojů, jelikož se pokaždé více či méně liší množství nanesené pájky, tavidla a doba prohřátí spoje. Ruční pájení je nevyhovující pro sériovou výrobu z důvodu malé rychlosti.

Na pájený povrch se tavidlo nanáší buď před ohřevem nebo při samotném procesu pájení, kdy je uvolňováno z dutinky v trubičce pájky. V dalším kroku se spoj ohřívá pomocí ruční páječky, která umožňuje nastavení požadované teploty. Nejvíce vyhovujícími jsou teploty mezi 320 °C–350 °C. Po dostatečném zahřátí je přiložena pájka, která se taví a smáčí pájenou plochu. Je důležité přikládat pájku až po dostatečném prohřátí povrchu.

Proces tuhnutí nastává, jakmile se oddálí páječka. Měli bychom zabránit jakémukoliv pohybu v místě pájeného spoje, dokud nedojde k zatuhnutí pájky. Na následujícím obrázku lze vidět tvorbu spoje ručním pájením. [7] [11]



**Obr. 6 - Tvorba ručně pájeného spoje [11]**

### 3.2 Strojní pájení

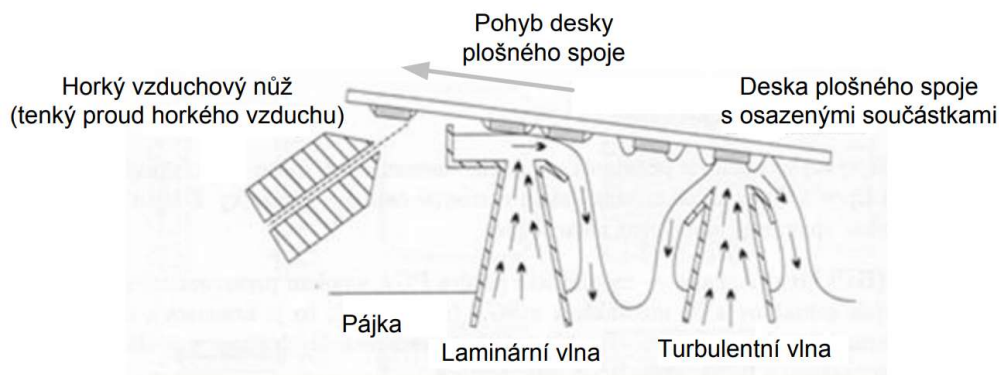
Strojové pájení není zatíženo chybou lidského procesu. Lze tak dosáhnout vysoké reprodukovatelnosti jednotlivých kroků pracovního postupu, což společně s vyšší přesností zajišťuje dostatečnou kvalitu u všech vytvořených spojů při sériové výrobě.

Díky urychlení výrobního procesu, značné úspoře materiálu a zrychlení výroby je z ekonomického hlediska strojní pájení značně efektivnější než pájení ruční. Nejčastěji v praxi používané metody jsou pájení vlnou a pájení přetavením, proto jim zde bude věnována větší pozornost v samostatných kapitolách. Ostatní metody zmíním pouze okrajově. [11] [12]

### 3.2.1 Pájení vlnou

Pájení vlnou neboli FLOW pájení je využíváno již mnoho let. Tento způsob umožňuje pájet součástky pro technologii THT (through hole technology) i součástky pro technologii SMT (surface mount technology). Pájka se nachází v tekutém stavu v kontejneru, kde se vytváří vlny. Deska, na které jsou již osazeny součástky, se pohybuje nad vlnou a smáčí se spodní povrch. Místa, která nejsou určena k pájení, jsou pokryta nepájevou ochranou vrstvou.

Některé typy součástek je třeba osadit až dodatečně. Jedná se zejména o polovodiče, elektrolytické kondenzátory a součástky v plastových pouzdrech. Tyto součástky by nevydržely teplotu pájky (ta bývá v rozmezí 140 °C až 160 °C), ve které se nachází po dobu několika sekund. [13] [11] [8]



**Obr. 7 - Pájení vlnou [13]**

Součástky určené pro povrchovou montáž je nutné před procesem pájení přilepit k povrchu desky speciálním lepidlem. Tato lepidla musí splňovat řadu podmínek. Mezi ty nejdůležitější patří malá roztékavost, dostatečná adheze k desce a součástce, zajištění dostatečné pevnosti spoje a elektrická nevodivost. Dále lepidla nesmí měknout s teplotou a chemicky ovlivňovat desku ani součástku a nesmí být toxická.

Z výše uvedeného obrázku lze vysledovat, že pájení vlnou využívá dvou vln. Turbulentní vlna podporuje funkci tavidla a zajišťuje dokonalé očištění spojovaných povrchů. Vlna laminární způsobuje

dokonalé homogenní vytvoření spoje. Na konci deska prochází nad horkým vzduchovým nožem, který odstraňuje přebytečnou pájku.

Tavidlo bývá na pájecí vlně. Jeho úkolem je odstranit ze spojovaných povrchů kysličníky, případně další sloučeniny, které zde vznikají reakcí povrchu s ovzduším, a zajistit tak kvalitu spoje. Zpravidla se jedná o organické sloučeniny, které musí být po zapájení desky omyty, jelikož by mohly způsobovat korozi spoje. [11] [13]

### 3.2.2 Pájení přetavením

Pájení přetavením je učeno pro sériovou povrchovou montáž a celý proces je složen z několika dílčích činností. V prvním kroku nanášíme na plošky, kam chceme připájet součástky, pájecí pastu. K nanesení pasty používáme buď technologii šablonového tisku nebo sítotisk. Při šablonovém tisku je přes připravenou šablonu protlačeno pomocí těrky požadované množství pájecí pasty. V některých případech lze použít také dispenzer, kdy dochází k vytlačování pasty dutým hrotem.

Jakmile je na desku nanesena pájecí pasta, osazují se pady součástkami za použití osazovacího automatu, který uchopuje součástky za pomoci podtlaku a umísťuje je na předem definované místo. V tomto stavu je deska zahřívána, dochází k aktivaci tavidla obsaženého v pájecí pastě a následně k přetavení pájecí pasty. Proces nanesení pájky a jejího ohřátí je oddělen jak prostorově, tak i časově. Existuje mnoho způsobů, jak lze desce dodat požadované teplo. Některé z nich popíšu níže. [10]

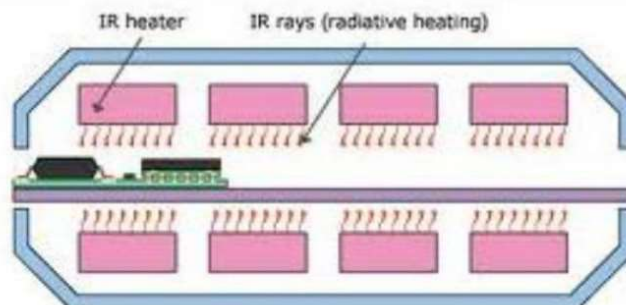
#### **Pájení infračerveným zářením**

Při této metodě je zapotřebí zdroj infračerveného záření. Tím je velmi často wolframová žárovka nebo halogenový zářič. Zdroj vyzařuje záření o určité vlnové délce ( $\lambda = 0,8 - 400 \mu\text{m}$ ) a pájený objekt toto záření absorbuje a tím se zahřívá. To, kolik tepla daný materiál pohltí, je dáno jeho koeficienty odrazu a absorpce. Čím více záření materiál pohltí, tím více se zahřeje. Povrchy, které mají tmavý, zdrsňený povrch, pohltí větší množství tepla nežli povrchy lesklé a světlé. Jelikož je deska plošného spoje složena z mnoha materiálů s různými barvami, dochází k nerovnoměrnému ohřevu, který může způsobit nadměrné tepelné namáhání některých součástek nebo naopak nezapájení spoje.

U sériové výroby probíhá pájení v průběžných infračervených pecích, kde se desky pohybují po pásovém dopravníku. Zdroje infračerveného záření jsou instalovány pod i nad dopravníkem a deska je tak prohřívána oboustranně. Pece mají několik oddělených, tepelně regulovaných zón, které slouží k přesnějšímu nastavení teplotního profilu.



Mezi výhody této metody patří vysoká účinnost. Naopak negativa nalézáme v nerovnoměrném ohřevu a případném stínění větších součástek. V praxi se často kombinuje tento typ ohřevu s ohřevem pomocí proudění horkého vzduchu. [11] [13]



**Obr. 8 - Pájení infračerveným zářením [11]**

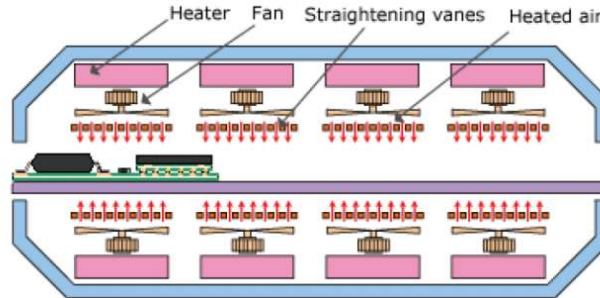
### **Konvekční pájení**

Konvekční pájení neboli pájení horkým plynem je zajištěno buď centrálním ohřevem plynu nebo pomocí trysek. Jako média se zde využívá buď vzduch nebo dusík, který zamezuje oxidaci pájky. Médium prochází ohřívacím zařízením a následně je pomocí trysky přiváděno na potřebný pájený bod. Množství dodaného tepla je regulováno rychlostí proudění a teplotou. Plyn, který vychází z trysky nabývá hodnot 350 °C–400 °C s průtokem 1–5 l/min.

U velmi malých součástek (například velikost 0201) může dojít k tomu, že díky velmi malé hmotnosti a malé ploše vývodu, která zajišťuje adhezi, proud vzduchu odfoukne součástky z povrchu DPS. Na tento fakt je třeba dbát a při pájení součástek takto malých rozměrů snížit rychlost proudění vzduchu. Využití trysky je vhodné zejména pro opravy, kde dochází zahřátí konkrétního bodu, a nikoliv celé desky.

U sériové výroby je využíváno konvekční pece, která je vybavena systémem topení ohřívající plyn a ventilátorů distribujících teplo po celé peci. Pec je stejně jako v přechozím případě vybavena několika zónami, které se dají tepelně regulovat. Desky se usadí na pásový dopravník, který prochází jednotlivými zónami a díky rychlosti posuvu společně s rozdílnými teplotami zón lze dosáhnout požadovaného teplotního profilu. Často bývá mimo pec umístěn další ventilátor, který pomáhá s ochlazením již přetavených desek.

Oproti přechodí metodě máme výhodu v relativně homogenní teplotě a nezávislosti prohřátí na barvě součástek. Nevýhodou je vyšší energetická náročnost a menší účinnost. Pro zamezení oxidace spojů se používá v některých případech dusík, který opět zvyšuje náklady na výrobu. [11]



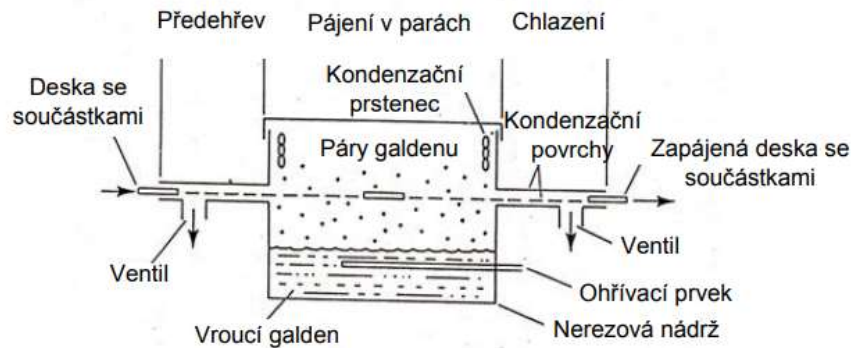
**Obr. 9 - Konvekční pájení [11]**

### Pájení v parách

Pájení v parách neboli kondenzační pájení je proces, během kterého je deska, součástky a vývody zahřívána teplem, které je uvolněno při kondenzaci par speciální pájecí kapaliny (Galden) na chladném povrchu DPS a také teplem samotné páry.

Tento proces se odehrává v parní komoře, která je buď průběžná nebo dávková. Pájecí teplota je určena bodem varu pracovní kapaliny, což zajišťuje konstantní teplotu. Bod varu závisí na složení kapaliny a pohybuje se mezi 55 °C a 270 °C. Páry pracovní kapaliny jsou velmi těžké a lehké plyny jsou vytlačeny, dochází tak ke vzniku ochranné atmosféry, která brání oxidaci pájených spojů.

Před umístěním do par Galdenu je deska nejprve předehřáta. Pájecí kapalina je zahřívána topným článkem na bod varu a páry kondenzují na DPS a stékají zpět do nádrže. Kondenzace probíhá na chladnějších místech, a tak dochází k rovnoměrnému ohřevu.



**Obr. 10 - Kontinuální pájení v parách (11)**

Mezi výhody patří vysoká účinnost, rovnoměrná pracovní teplota, potlačení oxidace a nadměrného zahřátí jednotlivých součástí. Nevýhodné jsou vysoké náklady na provoz a častý výskyt vady Thombstoning (efekt náhrobního kamene). [11] [13]

### 3.3 Typy pájecích slitin

Pájecí slitiny mají za úkol mechanicky zafixovat součástky na DPS, zajistit elektrické spojení, odvést ztrátové teplo a ochránit vývody před oxidací. Její vhodný výběr je tak pro kvalitní pájený spoj nezbytný.

S příchodem směrnice Evropské Unie RoHS (Restriction of hazardous substances), která omezuje užívání olova, zaznamenaly pájecí slitiny velké změny. Dříve velmi často využívaná pájka Sn63Pb37 s vynikajícími mechanickými i elektrickými parametry a také s nízkou teplotou tání, musela být nahrazena bezolovnatými pájkami. Ty mají nejenže vyšší pořizovací náklady, jelikož olovo je zde nahrazeno jinými drahými kovy (např. Ag, Ni, Bi), ale většinou také horší vlastnosti a vyšší teplotu tání. Pokud však vhodně kombinujeme přídatné prvky, lze snížit teplotu tání nebo zlepšit kvalitu spoje.

**Tabulka 2 – Vlastnosti prvků v pájkách [14]**

| Prvek               | Vlastnosti                                                                                              |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Stříbro (Ag)</b> | snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost a pevnost                                                          |
| <b>Bismut (Bi)</b>  | snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost                                                                    |
| <b>Měď (Cu)</b>     | zvyšuje pevnost                                                                                         |
| <b>Zinek (Zn)</b>   | nízký bod tání, nízká cena                                                                              |
| <b>Antimon (Sb)</b> | zvyšuje pevnost, snižuje povrchové napětí<br>pro lepší roztékavost a menší pravděpodobnost tombstoningu |
| <b>Indium (In)</b>  | snižuje bod tání                                                                                        |
| <b>Nikl (Ni)</b>    | zabraňuje odsmáčení                                                                                     |

Užití olovnaté pájky je dovoleno v oblastech, kde se klade požadavek na maximální spolehlivost. Těmito oblastmi jsou lékařství společně s leteckým a kosmickým průmyslem.

Pájecí pasta je tvořena přibližně z 90 % vodivými kuličkami, které dosahují velikosti od 5 µm do 160 µm. Jejich velikost se řídí pravidlem říkajícím, že do nejmenšího otvoru šablony by se mělo vejít 5 kuliček. [2] [10]

### 3.3.1 Sn63Pb37

Jedná se o nejpoužívanějšího zástupce olovnatých pájek a tento typ je složen z 63 % z cínu a z 37 % z olova. Tato pájecí slitina taje již při 183 °C, v čemž značně překonává bezolovnaté pájky. Vyznačuje se dobrou tekutostí, hladkým a lesklým spojem s vynikající mechanickou odolností a též výbornou smáčivostí. V současnosti se využívá pouze v extrémních případech (lékařství, letecký průmysl), kde je kladen důraz na kvalitu a spolehlivost spoje. V běžných činnostech je její užití omezeno směrnici RoHS.[10] [14]

### 3.3.2 SAC pájky

Tento druh je slitina cínu, mědi a stříbra. Nejznámějším a nejčastěji používaným typem je slitina SAC 305. Ta je složena z 96,5 % z cínu, z 3 % ze stříbra a 0,5 % zastává měď. Eutektická teplota je okolo 216 °C. Díky přidání stříbra dosahujeme nižší teploty tání, avšak zároveň zvyšujeme pravděpodobnost růstu dendritů na zapájené DPS, jelikož stříbro je vhodný prvek pro elektrochemickou migraci. Dále přispívá k tvorbě intermetalických vrstev, zejména  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ . Změnou poměrů jednotlivých složek lze měnit mechanické vlastnosti spoje. [10] [14]

### 3.3.3 SC pájky

Pájky typu SC se skládají ze slitiny cínu a mědi (nejčastěji využívaný poměr je 99,3 % Sn a 0,7 % měď. Eutektická teplota je okolo 227 °C a je 5 °C nižší nežli teplota tavení Sn. Dochází zde ke vzniku intermetalických sloučenin (zejména  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  a  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ).

Přidáním Ni (přibližně 0,01 – 0,05 %) či Ge (přibližně 0,005 %) lze zlepšit vlastnosti pájky. Pomocí vhodné kombinace dosahujeme zvýšení smáčivosti nebo snížení teploty tání. [10] [14]

### 3.3.4 SA pájky

U tohoto typu hovoříme o slitinách stříbra a cínu. Nejčastěji je používáno složení 96 % cín, 4 % stříbro. SA pájky mají teplotu tavení okolo 220 °C. Obsah stříbra, stejně jako v předchozích případech zvyšuje možnost elektrochemické migrace a také se podílí na tvorbě intermetalických sloučenin, zejména pak opět  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ . [10] [14]

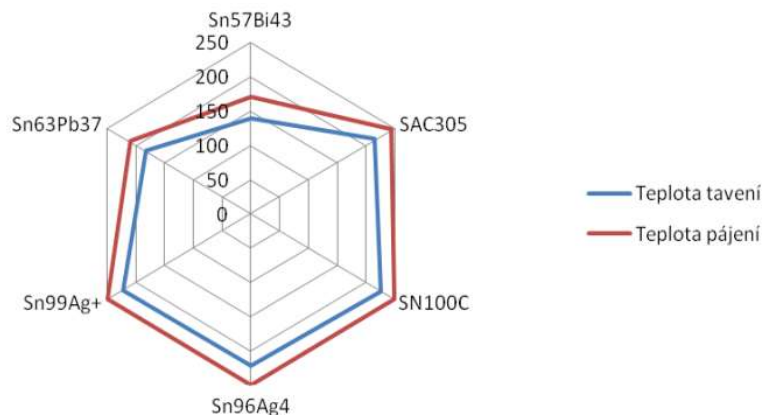
### 3.3.5 SB pájky

Oproti výše uvedeným pájkám je do tohoto typu přidáván bizmut. Slitina je tak tvořena kombinací Sn a Bi, díky čemuž je snižována teplota tání pod hranici 180 °C. SB pájky jsou také oproti předchozím typům levnějším.

Hlavní nevýhodou jsou horší mechanické vlastnosti. Tento nedostatek se však příliš neprojeví v oblasti spotřební elektroniky, a proto jsou tyto pájky používány právě zde.

Pokud vytvoříme slitinu tvořenou z 57 % cínem a 43 % bizmutem, dosahujeme velice nízké teploty přetavení, která je 139 °C a je nižší než u olovnatých pájek. [10] [14]

Na následujícím obrázku lze nalézt závislosti teploty tavení a pájení na použité slitině pro různé typy pájek. [14]



**Obr. 11 - Závislost teploty tavení a teploty pájení na použité slitině [14]**

### 3.4 Typy tavidel a jejich funkce

Tavidlo je nepostradatelnou součástí pájecí pasty a tvoří přibližně 10 až 15 % hmotnosti. Při ručním pájení se v některých případech přidává zvlášť. Tyto látky musí být chemické stálé a žádná součást tavidla nesmí být nebezpečná zdraví či životnímu prostředí. Proto se jeví jako vhodná tzv. VOC-free tavidla čili tavidla bez nestálé organické složky (volatile organic compound free), jejichž složky se nevypařují již při nízkých teplotách a neunikají do atmosféry. Mezi další výhody VOC free tavidel lze uvést nehořlavost a menší nebezpečnost v porovnání s tavidly na alkoholové bázi. Jako nevýhoda se jeví obsah vody, která může při nevhodných podmínkách zamrznout a větší povrchové napětí, které se dá však snížit vhodným aditivem.

Tavidlo má několik funkcí. Mezi ty základní patří odstranění nečistot spolu s oxidy z pájeného povrchu společně se zabráněním redukčně-oxidačních dějů v průběhu pájení. Také napomáhá tomu, že se pájka snadno rozteče, jelikož snižuje povrchové napětí pájecí slitiny a zvyšuje povrchové napětí pájeného povrchu. Dále zlepšuje rovnoměrnost rozložení tepla po celém povrchu pájecí plochy a přenos tepla ze zdroje na pájený spoj. Tavidlo ovlivňuje vlastnosti pájecí pasty (např. viskozita, lepivost).

Skladba tavidla je tvořena 3 složkami. Těmi jsou aktivátory, rozpouštědla a aditiva. Aktivátory narušují a odstraňují oxidy z pájeného povrchu, který se tak stává snadno smáčitelným a je nezoxidovaný. Jako příklad si můžeme uvést kyseliny chlorovodíkovou či fosforečnou, které se řadí mezi méně agresivní a mají vyšší aktivační teplotu. Mezi agresivnější patří kyselina olejová či karboxylová, jejich aktivační teplota je nižší, ale na povrchu zůstávají zbytky, které jsou korozivní a je nutné je odstranit.

Rozpouštědla nám usnadňují nanášení pájecí pasty. Jejich složky se odpařují už při předehřevu DPS. Pokud se však složky rozpouštědla neodpaří úplně během předehřevu, dochází během pájení k rozstříkávání pájecí pasty, což je nežádoucí proces.

Aditiva přidáváme pro úpravu vlastností tavidla. Jedná se například o barviva, tenzidy upravující povrchové napětí či antishlukovací činidla. [10]

Máme několik typů tavidel, jejich lehké přiblížení je níže.

#### **Organická tavidla**

Využití zejména při pájení vlnou. Jejich vlastnosti jsou lepší než kalafunová tavidla. Vyskytují se ve formě kapaliny nebo pasty. Jejich zbytky lze odstranit rozpouštědly na bázi vody – snadná odstranitelnost.

#### **Anorganická tavidla**

Využití pro neelektrické aplikace. V elektrických aplikacích se příliš nepoužívají z důvodu vysokého obsahu soli, jejich zbytky jsou vysoce korozivní a chemicky aktivní. Většinou ve formě past či roztoků.

#### **Kalafunová tavidla**

Dříve hojně využívané tavidlo pro olovnaté pájení z důvodu aktivační teploty okolo 170 °C. Je založené na bázi pryskyřice, která je rozpouštěna v roztoku, který je založen na alkoholové bázi. Díky přidáním vhodných aktivátorů lze zvýšit aktivační teplotu a díky tomu lze kalafunová tavidla použít i pro bezolovnaté pájení. [10]

### **3.5 Typy povrchových úprav**

Povrchové úpravy zásadně ovlivňují konečnou kvalitu spojů i proces pájení. Díky jejich užití lze desky déle skladovat, nedochází k oxidaci pájeného povrchu a zároveň zamezují vzniku nechtěných intermetalických sloučenin mezi materiálem pájené plošky a pájkou.

U rozhodování, kterou povrchovou úpravu použijeme, zvažujeme požadavky materiálové, procesní a enviromentální kompatibility. Materiálová kompatibilita se zabývá chemicko-fyzikálními vztahy

mezi použitou povrchovou úpravou a mědí pájecí plošky společně s nepájivou maskou. Procesní kompatibilita řeší tloušťku vrstvy, výslednou rovinnost povrchu či snadné řízení procesu. Co se týče kompatibility enviromentální, ta se zaobírá plněním směrnice RoHS, ekologického zpracování odpadních vod či netoxicitou povrchové úpravy.

Níže je uveden podrobnější popis nejčastěji využívaných úprav. Patří mezi ně HAL, ENIG, OSP a Imerzní Sn. [10] [11]

### 3.5.1 HAL

Typ povrchové úpravy HAL neboli hot air levelling je velice často užívaná úprava DPS, při které je deska ponořena do roztavené pájky (SnPb či bezolovnaté pájky) a následně pomalu vytažena. Vytvoříme tak další vrstvu, která chrání měděný povrch před oxidací. Proud horkého vzduchu odstraní přebytečnou pájku. Deska je vystavena značnému teplotnímu šoku, zejména při použití bezolovnatých pájek, jelikož pro roztavení pájky je třeba vysoká teplota, která může způsobit deformaci desky. Dále také dochází ke vzniku nerovností, jelikož pájka není rovnoměrně nanášena.

Tento nedostatek se řeší metodou vodorovného vyrovnání pájky horkým nožem. Deska je posouvána roztavenou pájkou na síťovém dopravníku. Horký nůž účinkuje ve vodorovném směru a gravitace pomáhá ve zlepšování rovinnosti této povrchové úpravy. [10] [11]

### 3.5.2 ENIG

Úprava ENIG neboli Electroless Nickel Imemersion Gold je založena na dvou částech. V té první dochází k nanášení chemického niklu o tloušťce přibližně 3-6  $\mu\text{m}$ . Jelikož samotný nikl by velmi zoxidoval, je nutné překrýt ho zlatou vrstvou tloušťky 0,05-0,1  $\mu\text{m}$ , která této oxidaci zabraňuje. Užití samotné zlaté vrstvy není možné, jelikož by se rozpustila velmi brzy do mědi. [10] [11]

Mezi výhody této úpravy patří absence olova, celý proces je bezolovnatý. Zároveň je plocha rovná a výborně pájitelná. Obsahem zlata se však zdražuje výroba. Dalším nedostatkem je chyba objevující se při výrobě tzv. black pad. Pájený spoj se odpojí od vrstvy niklu, z důvodu křehké intermetalické sloučeniny na přechodu nikl-cín. Výsledný spoj je také méně pevný a má horší kvalitu, jelikož zlato difunduje do vznikajícího spoje a vytváří se intermetalické sloučeniny  $\text{AuSn}_4$  a  $\text{AuSn}_2$ . [10] [17]

### 3.5.3 OSP

Organic Solder Preservatives je celé jméno této úpravy. Podstatou je nanášení organických inhibitorů oxidace mědi (nejčastěji látky na bázi benzoimidazolů) pomocí chemické metody. Deska

plošného spoje s odhalenou mědí je ponořena do lázně. Efektivní složky organických inhibitorů jsou zde drženy na povrchu pomocí Van der Waalsových sil. Vrstva takto naneseného materiálu dosahuje tloušťky okolo 0,1  $\mu\text{m}$  a hodí se pro všechny druhy kovů. Lze ji použít také jako ochrannou vrstvu u jiných povrchových úprav.

Výhoda spočívá v nízké ceně provedení, rovinnosti povrchu a odolnosti proti otěru. Nevýhodou je rychlé stárnutí nanesené vrstvy, a proto se takto upravené desky příliš dlouho neskladují. [10] [17]

#### 3.5.4 Imerzní Sn

Tato úprava spočívá v ponoření desek s obnaženou mědí do lázně cínu. Na měď je tak nanesena velmi dobře kompatibilní a vysoce rovinná vrstva tloušťky 1  $\mu\text{m}$ . Výhodou metody je nízká cena, která je zároveň technologicky nenáročná.

Nevýhodou je potřeba vysoké čistoty, jelikož zanesení nečistot snižuje smáčivost spoje. Je tak nutné pracovat v ochranných rukavicích a dbát na čistotu. Dále si musíme dát pozor na tvorbu whiskerů, které v některých případech mohou způsobit elektrický zkrat. Jejich růst je zaznamenán zejména na površích cínu. Pro jejich omezení lze přidat anti-whiskerová aditiva. Díky difuzi cínu do mědi i naopak dochází také ke vzniku intermetalických vrstev. Difuzi lze omezit organickým kovem tloušťky přibližně 0,08  $\mu\text{m}$ , který se nanáší mezi vrstvu mědi a cínu. Tuto metodu objevila firma Ormecon působící v Německu. [10] [17]

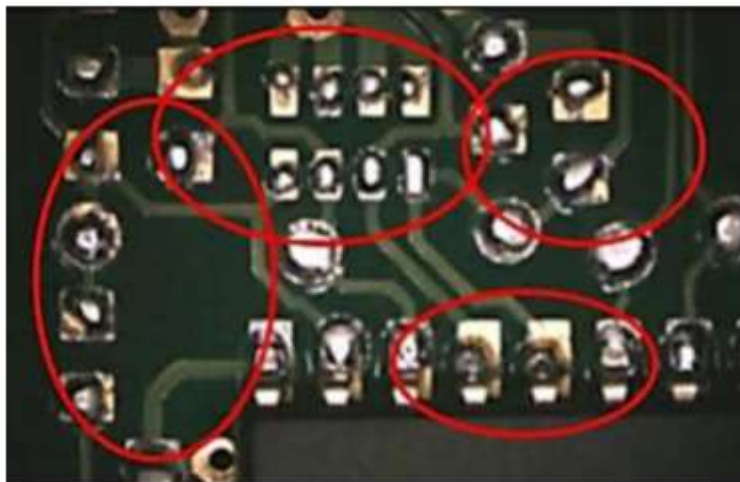
### 3.6 Výrobní vady

Jako každý proces i proces pájení obsahuje chyby. Proto je nutné celý proces pečlivě kontrolovat a monitorovat, abychom dokázali vzniklé chyby včas odhalit a případně je opravit. Vzniklé chyby mají vliv na funkčnost celého systému. Většina chyb vznikajících při procesu elektrotechnické montáže nastává při samotném pájecím procesu. Nejčastější chyby budou popsány níže. [6]

#### 3.6.1 Nesmáčivost

Nesmáčivost je chyba, která vznikne v případě, když pájka nepokryje pájecí plošku po celé její ploše. Díky tomu, že není potlačeno povrchové napětí pájky, vytvoří se na pájecí ploše pouze kapka. Příčinou vzniku je nejčastěji neúplně aktivované tavidlo, malé prohřátí spoje či nedostatečné množství nanesené pájky. Na obrázku níže lze pozorovat nesmáčivost téměř na všech ploškách. [2]





**Obr. 12 - Příklad nesmáčivost [18]**

### 3.6.2 Odsmásčeni

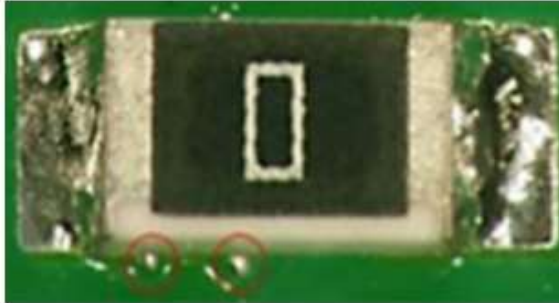
Odsmásčeni vypadá podobně jako nesmáčivost, příčina je však jiná. V tomto případě dochází k tomu, že pájka není na pájecích ploškách rozložena rovnoměrně díky nadměrnému zahřátí spoje. Vznikají intermetalické vrstvy způsobující změnu složení pájecí slitiny. Ta se vlivem měnící se smáčivosti stáhne do sebe a vytvoří na pájecích ploškách útvary připomínající malé ostrůvky. [2] [18]



**Obr. 13 - Příklad odsmásčeni [18]**

### 3.6.3 Kuličky pájky

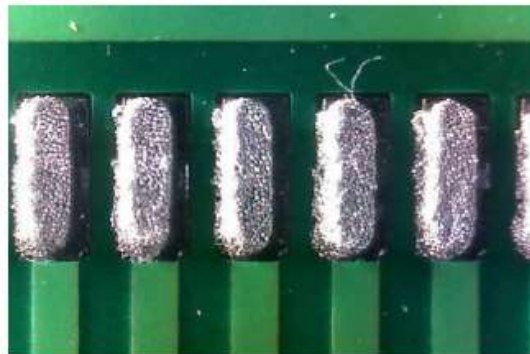
V některých případech dochází k tomu, že je nanášeno nadbytečné množství pájecí pasty, či je nanášena mimo pájecí plošku. Z pasty se během přetavení stávají kuličky, které v některých případech mohou vytvořit zkrat. [2] [10]



**Obr. 14 - Příklad kuličky pájky mimo pájecí plošku [18]**

### 3.6.4 Nedostatečné přetavení

Při této chybě nedochází k přetavení pájecí pasty a spoj nemá požadované mechanické a elektrické vlastnosti. Důvod je v nedostatečné maximální teplotě nebo špatně nastavený teplotní profil. Proto je vždy nutné dodržovat teplotní profil doporučený výrobcem pasty. [10]



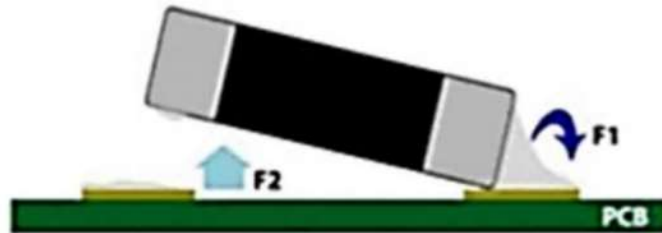
**Obr. 15 - Nedostatečně přetavený spoj [10]**

### 3.6.5 Špatné umístění součástky

Tato chyba se vyskytuje spíše u ručního pájení. Součástka není přesně osazena na pájecí plošky. Díky povrchovému napětí se může tato chyba sama napravit při procesu přetavení.

### 3.6.6 Thombstoning

Thombstoning, někdy též označovaný jako efekt náhrobního kamene, je jev, kdy se součástka vlivem nestejnsměrných sil na ni působících z obou stran postaví na jednu svou stranu a vznikne otevřený spoj. Tato vada postihuje hlavně malé SMD součástky. Příčiny této vady mohou být odlišné velikosti pájecích plošek, nestejněměrné nanesení pájecí pasty či odlišná distribuce tepla. Tyto odlišnosti způsobí různé povrchové napětí na padech. [10]



**Obr. 16 - Thombstoning [18]**

### 3.6.7 Popcorn efekt

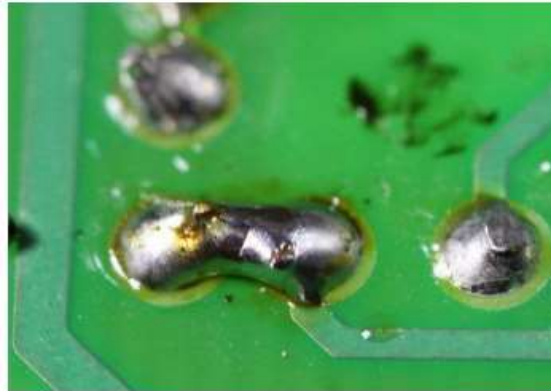
Chyba poskytující zejména zapouzdřené součástky, které jsou nevhodně skladovány (vlhké prostředí). Během skladování do sebe pouzdro natáhne vlhkost. Při procesu přetavení se tato vlhkost uvnitř pouzdra rozpíná, a pouzdro se tak deformuje. Vznikají boule, které v některých případech mohou poškodit pouzdro. [10]



**Obr. 17 - Popcorn efekt [10]**

### 3.6.8 Můstky

Můstky vznikají, pokud dojde k vodivému propojení dvou sousedních pájecích plošek. Vzniká zkrat, který může způsobit nefunkčnost celého systému. Četnost této chyby se s postupnou miniaturizací zvyšuje, a tak je potřeba klást důraz na správné navržení šablony, množství pájky a tlaku na stěrku. Můstky mohou být odhaleny pomocí optické kontroly SPI. [10]



**Obr. 18 - Vznik můstku [10]**

### 3.6.9 Whiskery

Whisker je vada, která se projevuje až po zapájení součástek. Jsou to tenké, elektricky vodivé vlásky spontánně vyrůstající z povrchu některých kovů. Samotný vlásek je čistý kov. Objevení této chyby se datuje okolo 50. let minulého století. Díky nyní používanému bezolovnatému pájení a zejména vysokému obsahu cínu v těchto pájecích slitinách se této problematice opět věnuje větší pozornost. Vlások o průměru 1  $\mu\text{m}$  dokáže růst rychlostí až 1 cm/rok. Příčiny vzniku nejsou stále jasné a tomuto tématu se věnuje řada výzkumů. [10] [2]

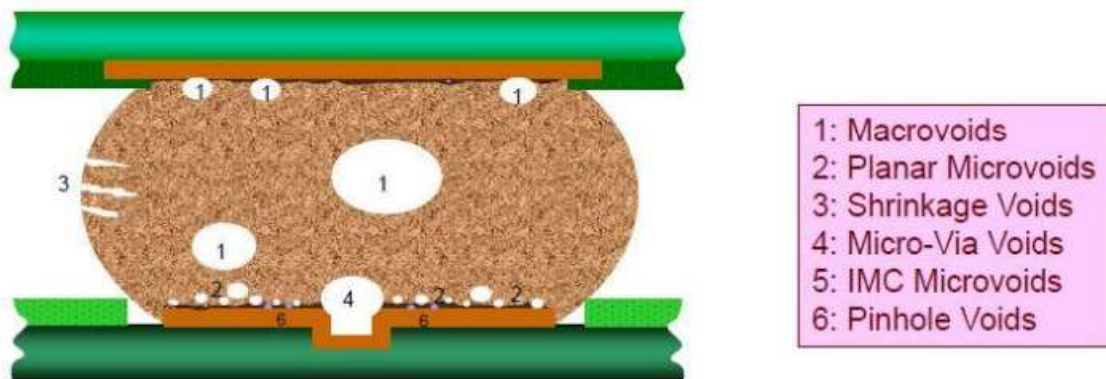


**Obr. 19 - Růst whiskerů [2]**

### 3.6.10 Voids

Dutinky, které vzniknou v objemu pájeného spoje, nazýváme voidy. Jsou vyplněny nekovovými materiály či plynem. Vznikají buď při příliš rychlém tuhnutí přetavené pájky, nebo při odpařování plynů tavidla. Jejich přítomnost v objemu spoje zhoršuje jeho spolehlivost, zvyšuje elektrický odpor, jelikož se snižuje plocha vodivé cesty.

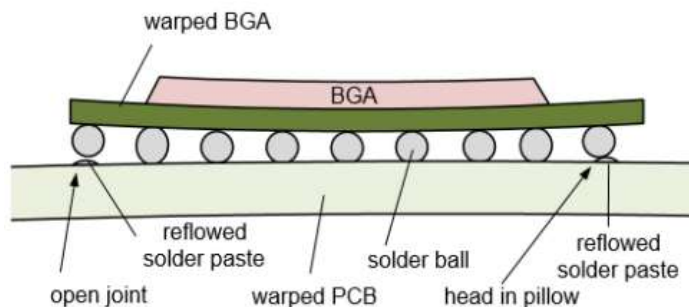
Rozlišujeme mikrovoidy, makrovoidy, pinhole voidy, Shrinkage a Kirkendalovy voidy dle umístění a tvaru. Některé zástupce lze vidět na obrázku níže. [10] [2]



**Obr. 20 - Různé typy voidů [10]**

### 3.6.11 Prohnutí pouzdra

Tento jev, někdy též nazývaný Warpage efekt, je důsledkem rozdílných koeficientů teplotní roztažnosti pájené součástky a DPS. Při změně teploty (chlazení nebo ohřívání) je deska deformována spolu s pouzdrům součástky. Proto bychom se vždy měli snažit použít komponenty s přibližně stejným koeficientem teplotní roztažnosti. [10] [2]



**Obr. 21 - Prohnutí pouzdra [18]**

### 3.6.12 Delaminace DPS

Při delaminaci dochází k oddělení sousedních vrstev DPS. Příčinou tohoto nežádoucího jevu je dutina obsahující vlhkost, která se nachází v základním materiálu. Během zahřívání při pájecím procesu se tato dutina začne rozpínat a dochází k separování sousedních vrstev. Jelikož některé základní materiály (např. FR4) jsou hyroskopické a absorbují atmosférickou vlhkost, je nutné vyrobené desky vakuově uzavřít a zabránit tak navlhání.

Další příčinou vedoucí k delaminaci může být špatná volba základního materiálu. Bezolovnaté pájky vyžadují vyšší teplotu pro přetavení a základní materiál nemusí tuto teplotu snést. Proto je potřeba při volbě na tento fakt brát zřetel. [24] [2]

### 3.6.13 Prasknutí prokovu

K prasknutí prokovu může dojít během přetavení, kdy je deska vystavena značnému tepelnému zatížení nebo následně při používání. Do desky jsou vrtány otvory, které jsou následně pokovovány. Kvalitu prokovu ovlivňují vlastnosti vyvrtaného otvoru. Je potřeba, aby byl hladký a bez výstupků. Výrobci však často z ekonomických důvodů překračují životnost vrtáků a otvory postupně vykazují horší vlastnosti. Opotřeбенý vrták místo vrtání pouze vytlačuje hmotu desky a vnitřní povrch je pak drsnější a vlákna skelné tkaniny prostupují do otvoru.

Výsledné pokovení tak není zcela homogenní a v některých místech je vrstva mědi příliš slabá. V těchto místech pak může dojít k prasknutí při tepelném zatížení, kdy se deska roztahuje v ose Z. Zároveň dochází k prostupu mědi hlouběji do DPS, kde zhoršuje elektrické vlastnosti. Prasknutí může být též způsobeno příliš slabou nanesenou vrstvou mědi. [24] [2]

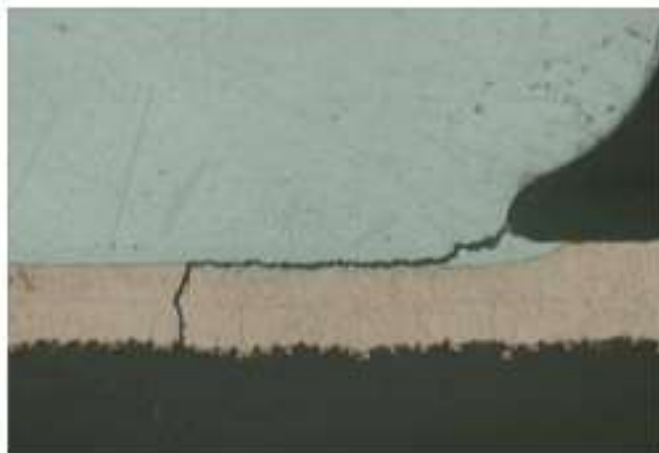
### 3.6.14 Pad cratering

Pad cratering je jev, při kterém dochází ke vzniku trhlinky pod pájecí ploškou určenou pro osazení součástkou, nejčastěji s typem pouzdra BGA (ball grid array). Tato trhlinka je způsobena odlišnými vlastnostmi mědi a substrátu, které se projeví působením mechanického napětí při výrobě či používání DPS.

Tento jev je velice nebezpečný, jelikož tato trhlinka způsobí rozpojení celého obvodu a je zdrojem okamžité poruchy nebo se projeví jako skrytá vada snižující dlouhodobou spolehlivost systému.

Využívání bezolovnatých pájek ještě zlepšilo podmínky pro tvorbu těchto vad. Jednak je zapotřebí vyšší teploty potřebné pro přetavení pájky a také často používané slitiny SAC (Sn-Ag-Cu) jsou významně

tvrdší a křehčí nežli bezolovnaté pájky. Tyto vlastnosti zvyšují mechanické zatížení působící na BGA plošky. Plošky s menšími rozměry jsou více náchylnější k odtržení, jelikož síla se nemůže příliš rozložit. [25]



**Obr. 22 - Pad cratering – trhlinka skrz pájecí slitinu a vodivý motiv [25]**

### 3.7 Hodnocení kvality

Vysoká výsledná spolehlivost a kvalita pájeného spoje a dlouhá životnost desek plošných spojů je prvořadým zájmem výrobce i spotřebitele DPS. Vzhledem k rozmanité četnosti a relativně vysoké frekvenci chyb je tedy vhodné zařadit do procesu výroby DPS systém kontrolních metod, které pomohou odhalit vadné kusy a vyřadit je tak z výrobního procesu. Kontrolní metody můžeme rozdělit do dvou základních skupin, a to optické kontrolní metody a elektrické kontrolní metody. Optické metody se využívají především v průběhu výroby DPS, zatímco elektrické metody se uplatňují spíše na konci výroby, kdy se zkouší výsledné elektrické parametry vyrobené desky a jejich správná funkčnost. [6]

#### 3.7.1 Optické kontrolní metody

Základní optickou kontrolou je zraková kontrola proškoleného pracovníka, který může kromě vlastního zraku používat lupu či mikroskop. Tato metoda je levná a jednoduchá, nicméně vhodnější je použití automatizované optické kontroly, a to především kvůli rychlosti kontroly většího množství pájených spojů. Automatických optických metod je velké škála a dá se jimi testovat prakticky vše od nanášení pasty až po kompletně osazenou desku plošných spojů. [6]

### **Automatická kontrola pasty – SPI**

Až 65 % procent všech chyb vzniká při nanášení pájecí pasty. Proto je klíčové použít kontrolní metodu, která monitoruje správné nanášení pasty na DPS. Princip metody SPI je založen na monitorování nanesené pasty kamerami, a to buď ve dvou rovinách nebo ve třech rovinách.

Při snímání ve dvou rovinách je kamera umístěna nad DPS s nanesenou pájecí pastou a porovnává sejmутý obraz s definovanou předlohou. Předlohu musíme vykonstruovat pomocí speciálního softwaru, ve kterém nadefinujeme rozměry DPS a umístění pájecích ploch, na které se bude pasta nanášet. Přes poměr ploch, na kterých je pasta umístěna a na kterých není, se vyhodnotí, zda je spoj akceptovatelný. Nevýhodou této metody je fakt, že můžeme kontrolovat pouze umístění pasty na DPS, ale nikoliv její správné množství a výšku.

Kontrola probíhající ve třech rovinách eliminuje nedostatky snímání ve 2D. Existuje více principů, na kterých může být tato metoda založena – základní možností je využití více kamer, další možností je vyhodnocení odlesků různých světelných zdrojů. Nejpřesnější metodou je využití laserového paprsku, který pod úhlem 60° snímá pastu a kontrolní přístroj pak snímá odraz paprsku od pasty a přes goniometrické funkce dopočítává výšku nanesené pasty. Kromě výšky, plochy (a tedy i objemu) pasty je možné touto metodou vyhodnotit i různé defekty, jako např. převislé či zaoblené defekty okraje pasty. [6]

### **Automatická optická kontrola – AOI**

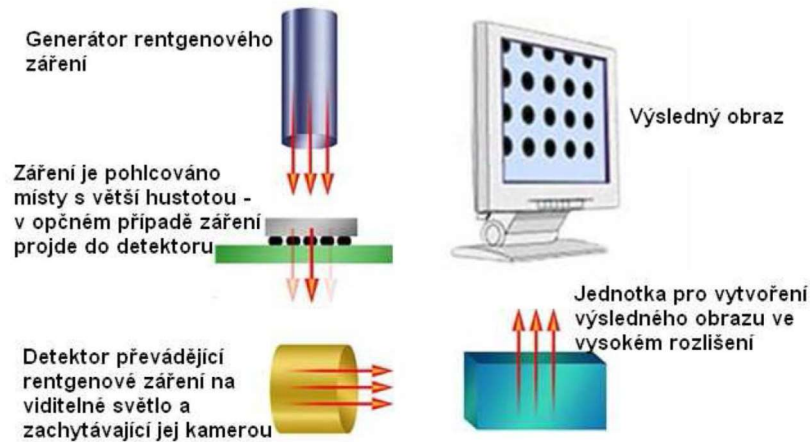
Tato optická kontrola využívá podobného principu jako SPI. Kamerou se snímá obraz DPS osazené součástkami a porovnává se s obrazem nahraným v systému. Kamery používané v této metodě mívají vysoké rozlišení a je možné použít jak barevný, tak černobílý obraz. Systém kontroluje správnou polohu součástek, orientaci součástek, případné nadzvednutí součástky, zkratky mezi vývody a další faktory a defekty. AOI je rychlá, flexibilní, dá se použít v různých fázích kontroly, na druhou stranu se s ní dají kontrolovat pouze viditelná místa. [6]

### **Rentgenová kontrola kvality spojů**

Rentgenová kontrola kvality spojů eliminuje nevýhody AOI. Princip této metody spočívá v emitování rentgenového záření na zkoumaný objekt, který část záření pohltí. Prošlá část záření dopadne na snímač RTG paprsků, který ho převádí na viditelné světlo, které je dále sejmутé kamerou a zobrazeno na monitoru. Touto metodou je tak možné zjistit přítomnost chyb, které bychom s pomocí AOI nebyli schopni



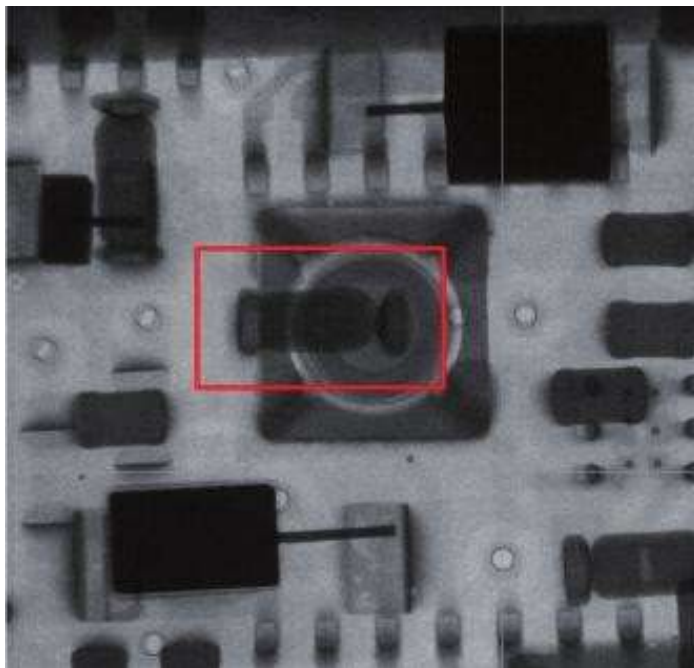
zjistit, jako jsou např. vady, mechanické trhliny uvnitř spojů, tvar a kvalitu spoje pod pouzdry součástek apod. Nevýhodou této metody je vysoká pořizovací cena kontrolního systému. [6]



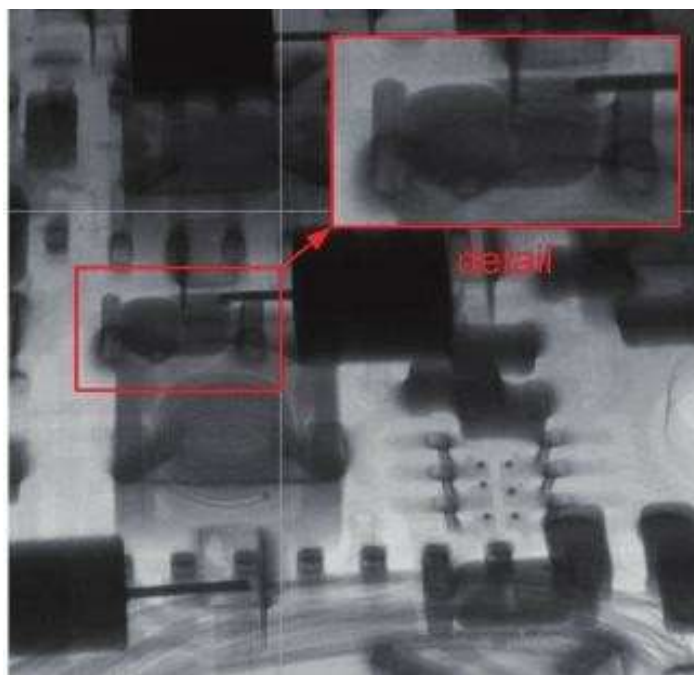
**Obr. 23 - Princip rentgenové kontroly [6]**

### Výpočetní tomografie

Výpočetní tomografie, označovaná zkratkou CT (computer tomography), je metoda vycházející z rentgenové kontroly. Analyzovaný vzorek se oproti klasické RTG metodě snímá z pod velkým počtem úhlů, při kterém dostaneme velké množství snímků (řádově stovky až tisíce). Z těchto snímků se pomocí matematických transformací vytvoří trojrozměrný RTG model. Důvodem, proč se k této metodě uchylujeme, je, že při jednom RTG snímku se může stát, že chyby pájeného spoje nemusí být viditelné. Jako příklad můžu uvést dva snímky, na obr. 14 je RTG snímek, kdy je zářič, vzorek a snímač v jedné přímce a na kontrolované součástce není viditelná žádná chyba. Při pohledu z jiného úhlu – obr.15 – je už však jasně patrná prasklina na pouzdře součástky. [15]



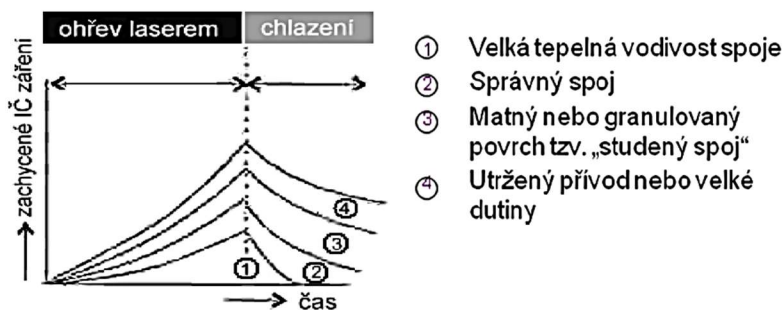
**Obr. 24 - Snímek RTG metody kontrolovaného pouzdra součástky [16]**



**Obr. 25 - Snímek CT metody kontrolovaného pouzdra součástky [16]**

## Laserová kontrola kvality spojů

Laserový paprsek je možné použít v SPI anebo lze využít tzv. Vanzettiho systém. Pomocí výkonného laserového pulsu zahřejeme kontrolovaný pájený spoj a následně měříme průběh teploty spoje bezdotykovým čidlem. Přes výslednou křivku teploty spoje pak můžeme zjistit kvalitu výsledného spoje. [6]



Obr. 26 - Laserová kontrola kvality spojů [6]

### 3.7.2 Elektrické kontrolní metody

Cílem elektrických kontrolních metod je ověřit správnou funkčnost vyrobené, osazené a zapájené DPS. Již při návrhu DPS je s těmito metodami počítáno a na deskách jsou tak vhodně navrženy vývody testovacích a měřících obvodů. Elektrické kontrolní metody můžeme rozdělit do 3 stupňů. [6]

#### První testovací stupeň

První testovací stupeň se soustředí na kontrolu připájených součástek. Cílem je testovat hlavní elektrické parametry. Testování je realizováno pomocí jehlových polí, která jsou zdrojem napětí a proudů a kontaktují se k měřícím vývodům testovaných součástek. [6]

#### Druhý testovací stupeň

Rozdíl mezi prvním a druhým testovacím stupněm je pouze ve velikosti zkoušených celků. Po otestování parametrů jednotlivých součástek v prvním stupni se tedy testuje správná funkčnost jednotlivých celků DPS. Realizace zkoušky probíhá znovu pomocí testovacího jehlového pole. [6]

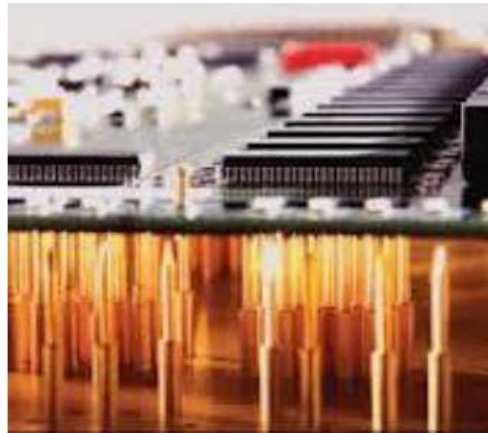
#### Třetí testovací stupeň

Třetí testovací stupeň se někdy nazývá také systémový test. Na vstupní konektory zkoušené DPS přivedeme testovací napětí a proud a na výstupních konektorech měříme správnost odezvy zapájeného systému. [6]

### **Jehlová testovací pole**

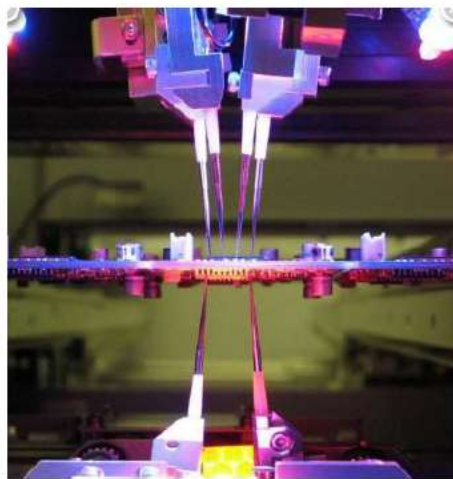
Jehlová pole se využívají při prvním a druhém stupni elektrických kontrolních metod. Na měřicí vývody DPS se přiloží kontakty měřícího přístroje ve tvaru jehel a pouští se přes ně definované napětí a proud. Existují dva typy jehlových polí, ačkoliv princip měření zůstává u obou typů stejný.

Prvním typem je statické jehlové pole. Výhodou je rychlejší měření, ovšem pro každou testovanou DPS je nutné sestavit nové testovací pole. [6]



***Obr. 27 - Statická testovací pole [6]***

Druhým typem je tzv. létající jehlové pole. Nevýhodou tohoto pole je delší doba měření, výhodou je pak vysoká flexibilita pole. Pro vytvoření vhodné struktury testovacího pole stačí zadat souřadnice do příslušného softwaru a jehlové pole se pak vyrovná do správné polohy. [6]



***Obr. 28 - Létající testovací pole [6]***

## 4. Praktická část

Praktická část je zaměřena na zkoumání vlastností substrátů, zejména na jejich teplotní roztažnost. Tato vlastnost může mít vliv na funkci desek. Z průběhu roztažnosti v závislosti na čase lze určit i teplotu skelného přechodu  $T_g$ , tu porovnáme s daty uvedenými výrobcem. Všechny vzorky jsou vyrobeny ze stejného materiálu a liší se pouze počtem na sebe navrstvených jader a tím, že jedna várka byla teplotně zatížena v době před měřením roztažnosti.

### 4.1 Popis použitých zařízení

V této kapitole bude uveden soupis všech použitých zařízení společně s popisem, jakým byla využívána.

#### 4.1.1 Teplotní profiloměr

Profiloměr slouží pro přesné měření teplotního profilu v horkovzdušné peci, který se může často lišit od hodnot zadaných na řídicím panelu pece. Pro změření teplotního profilu bylo nutné připájet termočlánky daného profiloměru na pomocnou DPS a změřit tak skutečný průběh.

K dispozici jsem měl zařízení KIC, které prodává firma AMTECH. Zařízení bylo pomocí USB připojeno k počítači a v programu KIC2000 se daly upravovat podmínky měření. Následně byla data vyexportována a posloužila pro vytvoření teplotního profilu.



*Obr. 29 – Profiloměr*

#### 4.1.2 Horkovzdušná pec

Tato pec posloužila pro jednu várku vzorků. Docházelo zde k simulaci teplotního zatížení, kterému jsou desky vystaveny během pájení přetavením. Jednalo se o horkovzdušnou pec Mistral 260. Ta je vybavena dotykovým displejem, kde lze nastavit teplotu jednotlivých zón a rychlost pásového dopravníku. Celkem má pec 3 zóny s rozdílnou teplotou.

Na displeji byly nastavené následující hodnoty: Preheat 1 150 °C, Preheat 2 190 °C, Reflow 260 °C, rychlost posuvníku byla zadána na 15 cm/min.



**Obr. 30 - Horkovzdušná pec Mistral 260 [19]**

#### 4.1.3 Termomechanický analyzátor Q400 TMA

Jedná se o výrobek firmy TA instruments, konkrétně o Q400 TMA. Tento termomechanický analyzátor je schopen zaznamenávat velmi drobné změny rozměrů měřeného vzorku a také velice hladce a mírně regulovat teplotu v širokém teplotním rozsahu. Na katedru elektrotechnologie byl zakoupen pouze nedávno. Je vhodný pro výzkumné práce a kontrolu kvality. Toto zařízení bylo stěžejní pro celou praktickou část. Data byla přenášena do připojeného počítače, kde se analyzátor dal ovládat díky programu TA Instrument explorer dodávaného firmou. Hodnocení a export dat zase umožňoval program TA Universal Analysis.



**Obr. 31 - Termomechanický analyzátor Q400 TMA [20]**

## 4.2 Vzorky a jejich popis

Vzorky byly objednány od externí firmy. Jádro bylo z materiálu označovaného jako ISOLA IS400. Celkem byly vytvořeny tři modifikace. U první se jednalo pouze o samotné jádro tloušťky 1 mm. Ve druhém případě se jednalo o dvě jádra, každé o tloušťce 1 mm, proložené prepregem 1080 FZ01 tloušťky 0,65 μm. Třetí varianta jsou tři na sobě navrstvená jádra, každé o tloušťce 1 mm a jsou opět proložená prepregem jako v předchozím případě.

Na následující tabulce lze nalézt technickou specifikaci materiálu ISOLA IS400.

| Property                                               | Typical Value                                                                                  | Units                 | Test Method              |                       |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
|                                                        |                                                                                                | Metric (English)      | IPC-TM-650 (or as noted) |                       |
| Glass Transition Temperature (Tg) by DSC               | 150                                                                                            | °C                    | 2.4.25C                  |                       |
| Decomposition Temperature (Td) by TGA @ 5% weight loss | 330                                                                                            | °C                    | 2.4.24.6                 |                       |
| Time to Delaminate by TMA (Copper removed)             | A. T260<br>B. T288                                                                             | >60<br>>10            | Minutes                  | 2.4.24.1              |
| Z-Axis CTE                                             | A. Pre-Tg                                                                                      | 50                    | ppm/°C                   | 2.4.24C               |
|                                                        | B. Post-Tg                                                                                     | 250                   | ppm/°C                   | 2.4.24C               |
|                                                        | C. 50 to 260°C, (Total Expansion)                                                              | 3.3                   | %                        |                       |
| X/Y-Axis CTE                                           | Pre-Tg                                                                                         | 13                    | ppm/°C                   | 2.4.24C               |
| Thermal Conductivity                                   |                                                                                                | 0.36                  | W/mK                     | ASTM E1952            |
| Thermal Stress 10 sec @ 288°C (550.4°F)                | A. Unetched                                                                                    | Pass                  | Pass Visual              | 2.4.13.1              |
|                                                        | B. Etched                                                                                      |                       |                          |                       |
| Dk, Permittivity                                       | A. @ 100 MHz                                                                                   | 4.00                  | —                        | 2.5.5.3               |
|                                                        | B. @ 500 MHz                                                                                   | 3.90                  | —                        | 2.5.5.9               |
| Df, Loss Tangent                                       | A. @ 100 MHz                                                                                   | 0.020                 | —                        | 2.5.5.3               |
|                                                        | B. @ 500 MHz                                                                                   | 0.022                 | —                        | 2.5.5.9               |
| Volume Resistivity                                     | A. C-96/35/90                                                                                  | 4.0 x 10 <sup>8</sup> | MQ-cm                    | 2.5.17.1              |
|                                                        | B. At elevated temperature                                                                     | 7.0 x 10 <sup>7</sup> |                          |                       |
| Surface Resistivity                                    | A. C-96/35/90                                                                                  | 3.0 x 10 <sup>6</sup> | MQ                       | 2.5.17.1              |
|                                                        | B. At elevated temperature                                                                     | 5.4 x 10 <sup>6</sup> |                          |                       |
| Dielectric Breakdown                                   |                                                                                                | >50                   | kV                       | 2.5.6B                |
| Arc Resistance                                         |                                                                                                | 120                   | Seconds                  | 2.5.1B                |
| Electric Strength (Laminate & laminated prepreg)       |                                                                                                | 48 (1100)             | kV/mm (V/mil)            | 2.5.6.2A              |
| Comparative Tracking Index (CTI)                       |                                                                                                | 3 (175-249)           | Class (Volts)            | UL 746A<br>ASTM D3638 |
| Peel Strength                                          | A. Low profile copper foil and very low profile copper foil all copper foil >17 μm [0.669 mil] | 1.05 (6.0)            | N/mm (lb/inch)           | 2.4.8C                |
|                                                        | B. Standard profile copper                                                                     | 1.45 (9.0)            |                          | 2.4.8.2A              |
|                                                        | 1. After thermal stress                                                                        | 1.25 (8.0)            |                          | 2.4.8.3               |
|                                                        | 2. At 125°C (257°F)                                                                            | 1.45 (9.0)            |                          | 2.4.8.2A              |
| Flexural Strength                                      | A. Length direction                                                                            | 82.0                  | ksi                      | 2.4.4B                |
|                                                        | B. Cross direction                                                                             | 66.6                  |                          |                       |
| Tensile Strength                                       | A. Length direction                                                                            | 51.2                  | ksi                      | ASTM D3039            |
|                                                        | B. Cross direction                                                                             | 41.7                  |                          |                       |
| Young's Modulus                                        | A. Length direction                                                                            | 3663                  | ksi                      | ASTM D790-15e2        |
|                                                        | B. Cross direction                                                                             | 3328                  |                          |                       |
| Poisson's Ratio                                        | A. Length direction                                                                            | 0.183                 | —                        | ASTM D3039            |
| B. Cross direction                                     | 0.151                                                                                          |                       |                          |                       |
| Moisture Absorption                                    |                                                                                                | 0.18                  | %                        | 2.6.2.1A              |
| Flammability (Laminate & laminated prepreg)            |                                                                                                | V-0                   | Rating                   | UL 94                 |
| Relative Thermal Index (RTI)                           |                                                                                                | 130                   | °C                       | UL 796                |

The data, while believed to be accurate and based on analytical methods considered to be reliable, is for information purposes only. Any sales of these products will be governed by the terms and conditions of the agreement under which they are sold.

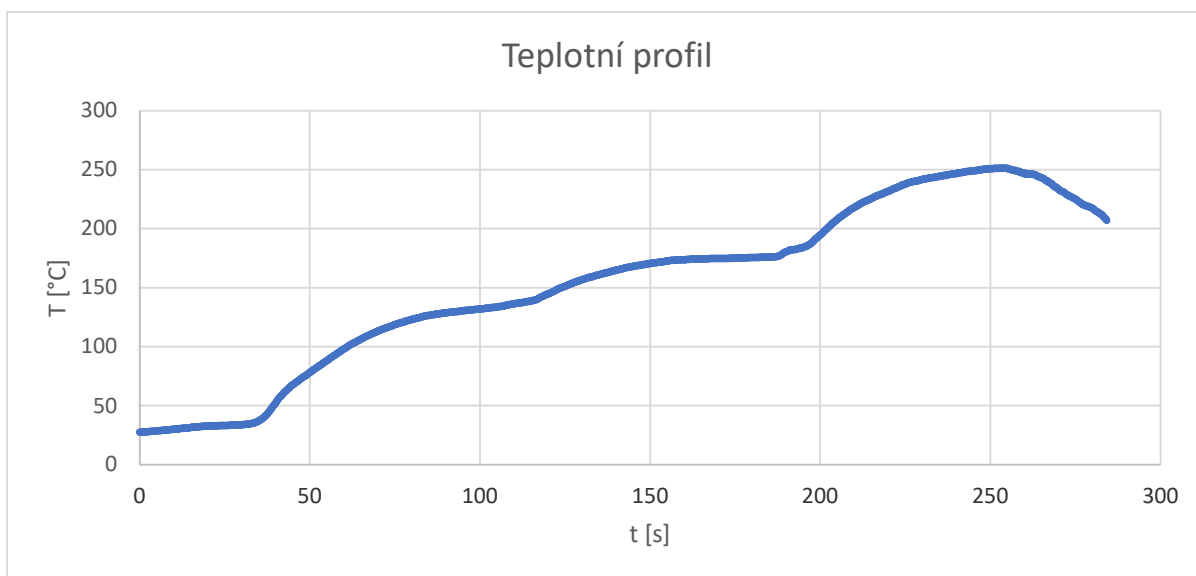
**Tabulka 3 -Vlastnosti materiálu ISOLA IS400 [21]**

Tři vzorky byly testovány rovnou a další tři dodané vzorky byly zatíženy v horkovzdušné peci Mistral.

Na té byly nastaveny následující hodnoty (simulovalo se tepelné zatížení při pájení přetavením u slitin SAC).

- Preheat 1 = 150 °C
- Preheat 2 = 190 °C
- Reflow = 260 °C
- Rychlost pásového dopravníku = 15 cm/min

Pro tyto hodnoty jsem změřil následující teplotní profil:



**Graf 1 - Teplotní profil pro tepelné zatížení vzorků**

Pro lepší přehlednost přikládám tabulku s názvem vzorků a jejich vlastnostmi. Dále budou v práci uváděny pouze pod těmito názvy, aby nevznikaly nejasnosti.

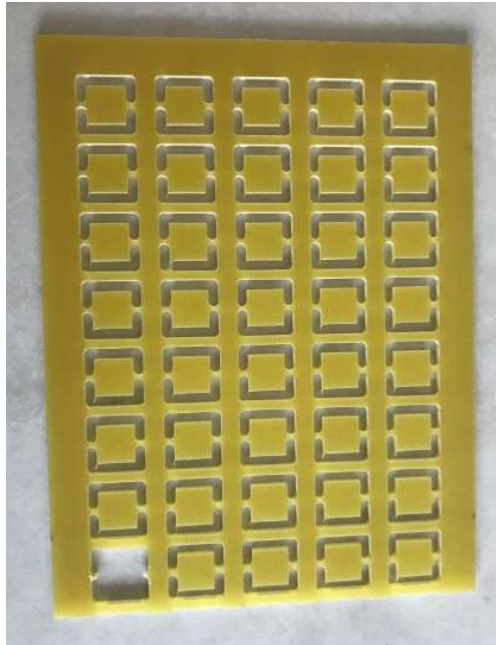
| Název vzorku | Počet jader | Proložení jader prepregy | Tepelné zatížení v peci Mistral 260 |
|--------------|-------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Jádro 1      | 1           | NE                       | NE                                  |
| Jádro 2      | 2           | ANO (1x)                 | NE                                  |
| Jádro 3      | 3           | ANO (2x)                 | NE                                  |
| Jádro 1 pec  | 1           | NE                       | ANO                                 |
| Jádro 2 pec  | 2           | ANO (1x)                 | ANO                                 |
| Jádro 3 pec  | 3           | ANO (2x)                 | ANO                                 |

**Tabulka 4 - Seznam vzorků**



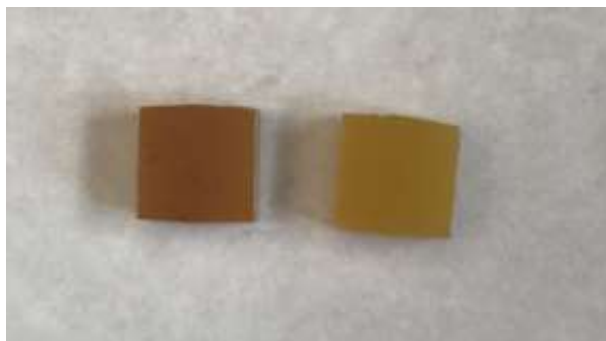
### 4.3 Stručný popis měření

Nejprve bylo nutné připravit si samotné vzorky. Jeden čtvereček měl rozměr 0,8 cm x 0,8 cm.



**Obr. 32 - Tabulka vzorků**

Následně byly 3 vzorky tepelně zatíženy v peci, a to se projevilo na změně jejich barvy, kdy došlo k jejich ztmavnutí. Na následujícím obrázku lze vidět vzorky a Jádru 3 pec (vlevo) a Jádru 3 (vpravo).



**Obr. 33 - Změna barvy po tepelném zatížení**

Před každým samotným měřením bylo třeba zkalibrovat měřící sondu, která zjišťovala teplotní změnu.

Poté došlo k umístění vzorku na stage (podložku) a změření jeho velikosti. V dalším kroku se sjelo s pecí, která zajišťovala definovaný přísun tepla a znovu se změřila velikost vzorku, aby se ověřilo, zda nedošlo k jeho posunu nebo jiné nepředvídané události, jelikož na vzorek již v tuto chvíli nebylo vidět.



**Obr. 34 - Detail měřicí sondy a stage s vloženým vzorkem**

Dále bylo třeba nastavit parametry pro měření. Ty byly následující:

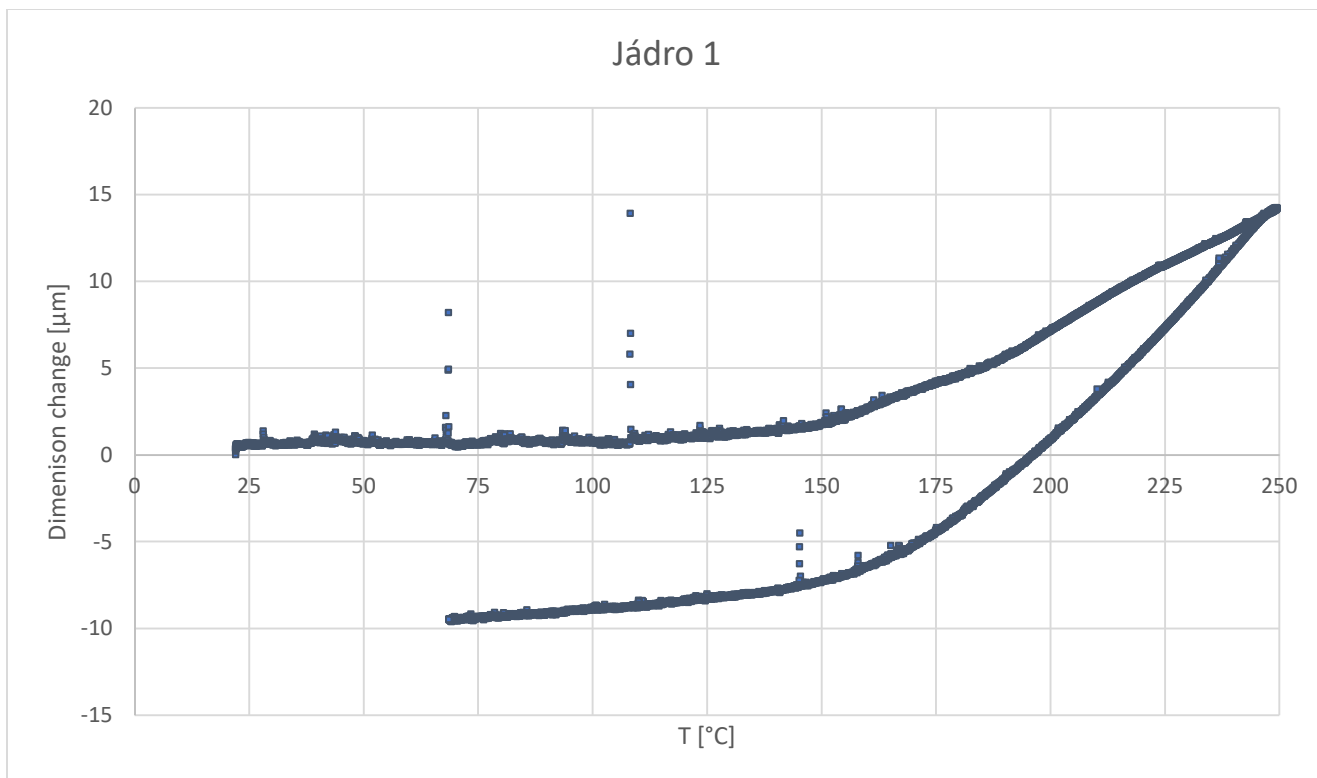
- Flow rate: 100 ml/min
- Force: 0,0010 N
- Ramp 5 °C/min to 250 °C
- Ramp 5 °C/min to 60 °C
- Flow rate 0 ml/min

Flow rate udává množství přidávaného dusíku během měření. Force značí přítlačnou sílu sondy na vzorek a ramp značí teplotní nárůst v čase. Nejprve jsou uvedeny hodnoty pro ohřev a poté pro chladnutí. Plynný dusík se přidává z důvodu vytvoření inertní atmosféry.

Po zadání výše uvedených hodnot a zahájení měření již přístroj měřil sám. Po dokončení měření jsem vzorek vyjmul a provedl znovu celý postup znovu s dalším vzorkem.

#### 4.4 Naměřené výsledky

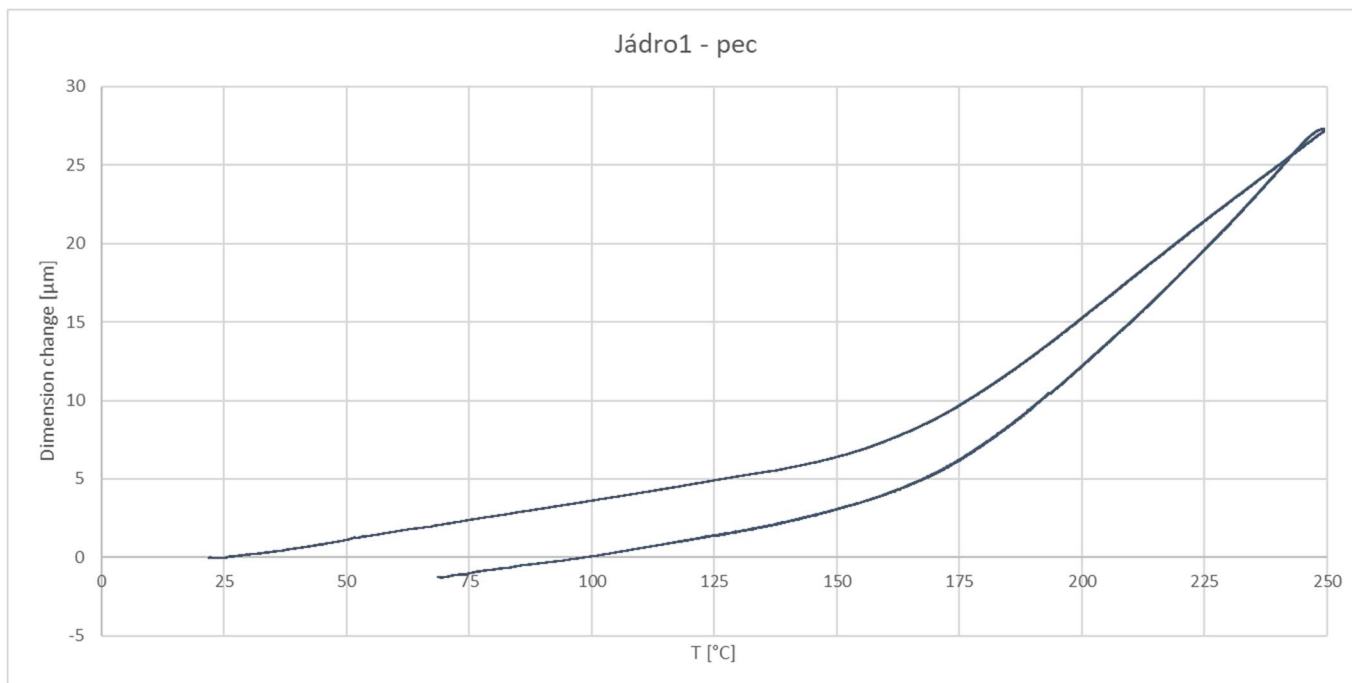
Data naměřená termomechanickým analyzátozem byla vyexportována jako textový soubor, který jsem převedl do Excelu a vytvořil požadované průběhy.



**Graf 2 - Průběh termomechanické analýzy vzorku Jádro 1**

Ve výše uvedeném průběhu lze pozorovat peaky, které byly způsobeny otřesy v měřící místnosti (odsouvání židle od stolu, dosedání na židle atd.). Lze pozorovat skelný přechod okolo teploty 150 °C, to se shoduje s daty výrobce. Skelný přechod je stanoven pro místo, kdy rozměrová změna mění svůj průběh z lineárního na exponenciální. Po zahřátí došlo ke zmenšení vzorku o přibližně 10 µm. Zmenšení způsobilo vytvrzení epoxidu.

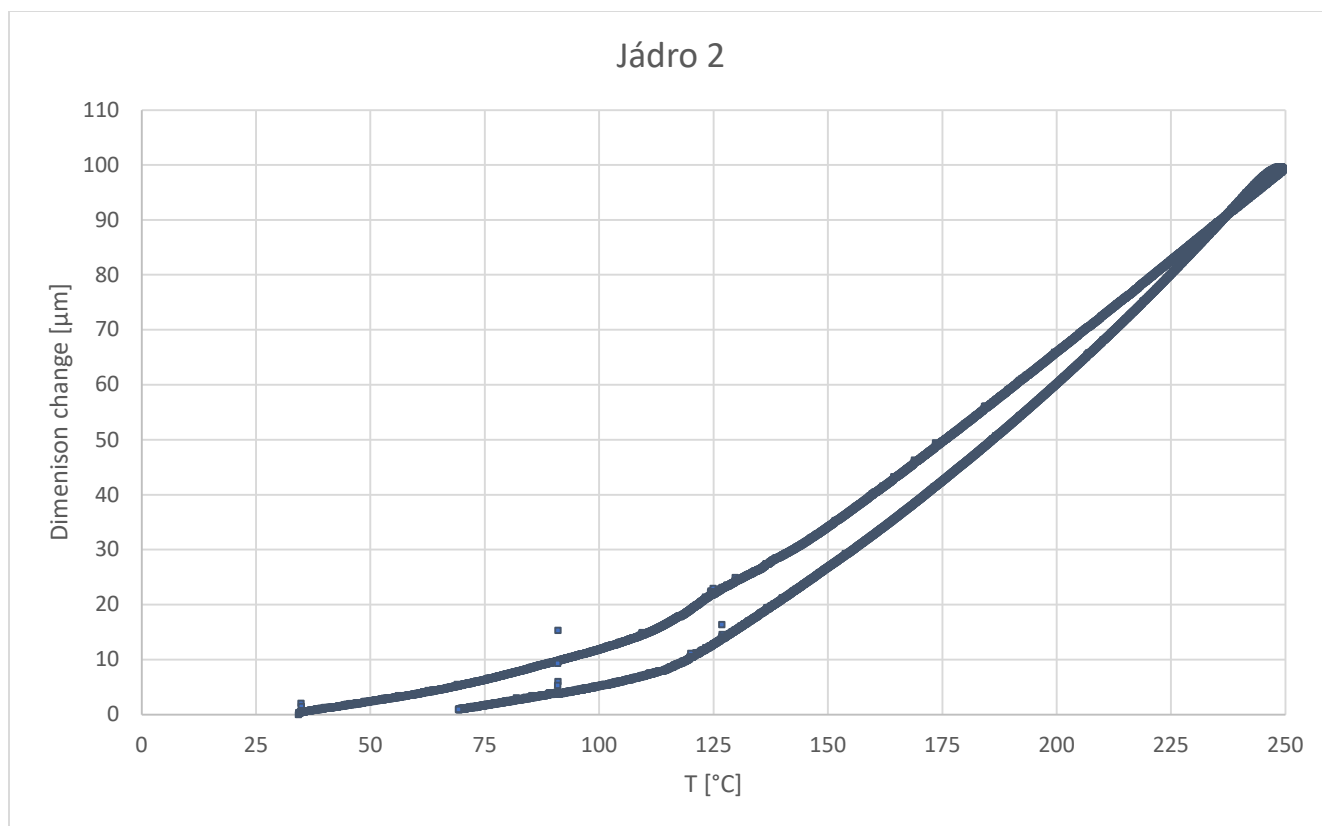
Deska se při zahřátí zvětšila o 14 µm a při následném chladnutí se zmenšila o 23 µm.



**Graf 3 - Průběh termomechanické analýzy vzorku Jádro 1 pec**

U tohoto průběhu lze pozorovat hladší křivku. To je způsobeno tím, že vzorky projeté pecí byly měřeny v době, kdy byl v místnosti menší provoz a také tím, že analyzátor byl již umístěn na stole, který nepřenášel vibrace a otřesy z místnosti na měřicí pracoviště.

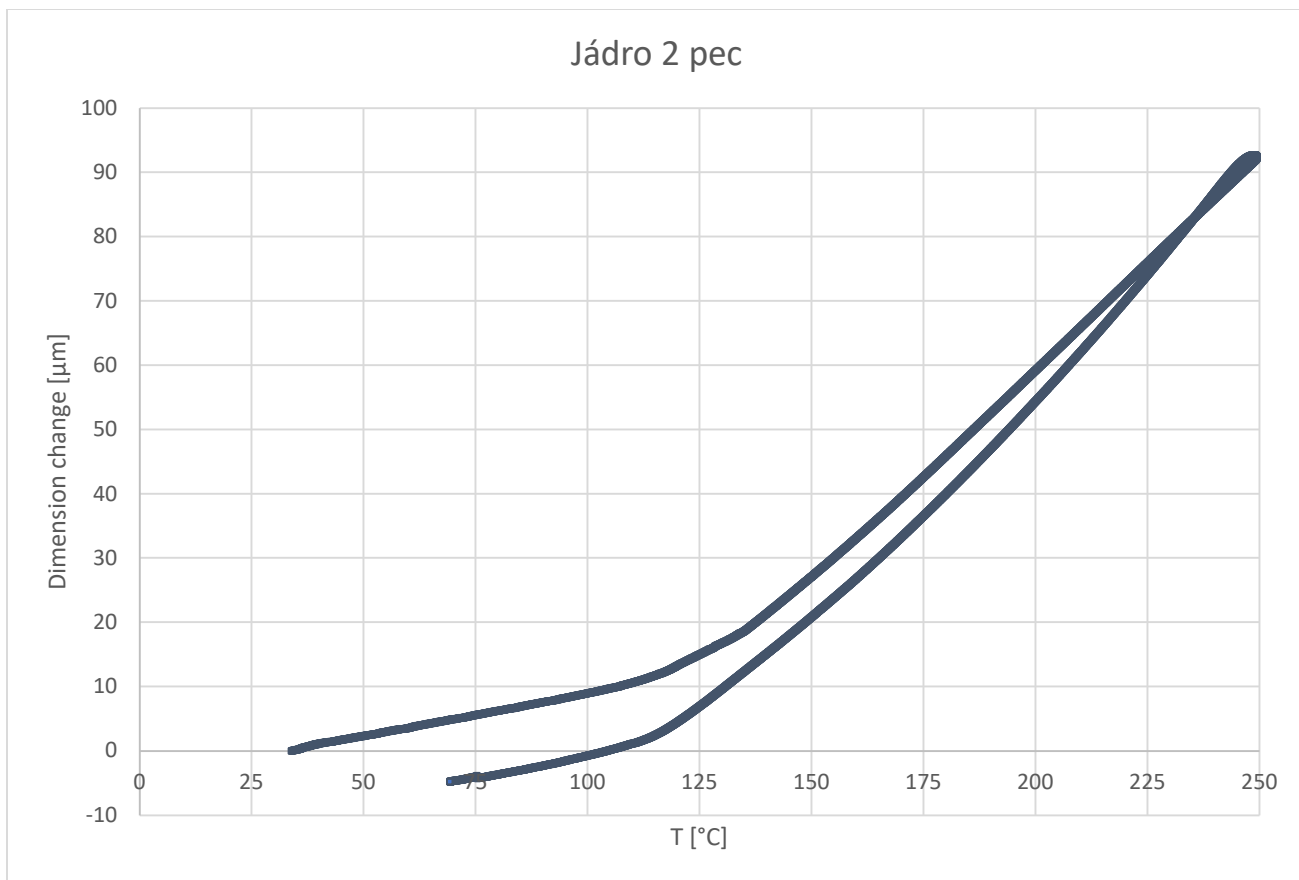
Teplota skelného přechodu se posunula k hodnotě okolo 160 °C, to mohlo být způsobené tím, že při předchozím zahřátí v peci byl epoxid vytvrzen a změnil tak lehce vlastnosti desky. Při zahřání se deska zvýšila o 26 µm.



**Graf 4 - Průběh termomechanické analýzy vzorku Jádro 2**

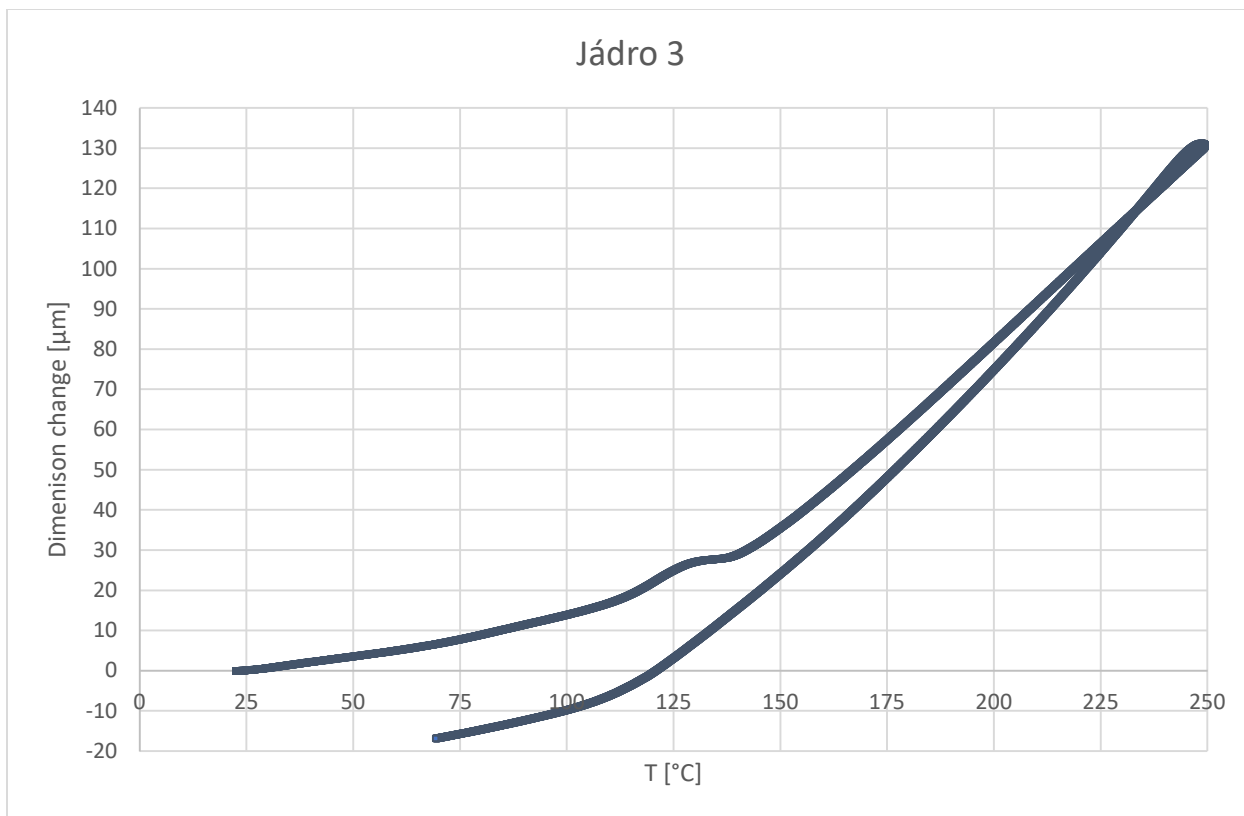
Opět lze pozorovat drobné peaky, způsobené otřesy v místnosti. Vidíme, že vzorek se roztáhl o 100 µm. Teplota skelného přechodu se nachází přibližně okolo 130 °C. Po chladnutí nedošlo ke zmenšení vzorku.

V porovnání s předchozími grafy vidíme značný rozdíl v celkové roztažnosti i teplotě skelného přechodu. Takto změněná teplota skelného přechodu by mohla být způsobena vloženými prepregy, avšak změna mi přijde velice razantní. S největší pravděpodobností se jednalo a záměnu materiálu dodaného výrobcem.



**Graf 5 - Průběh termomechanické analýzy vzorku Jádro 2 pec**

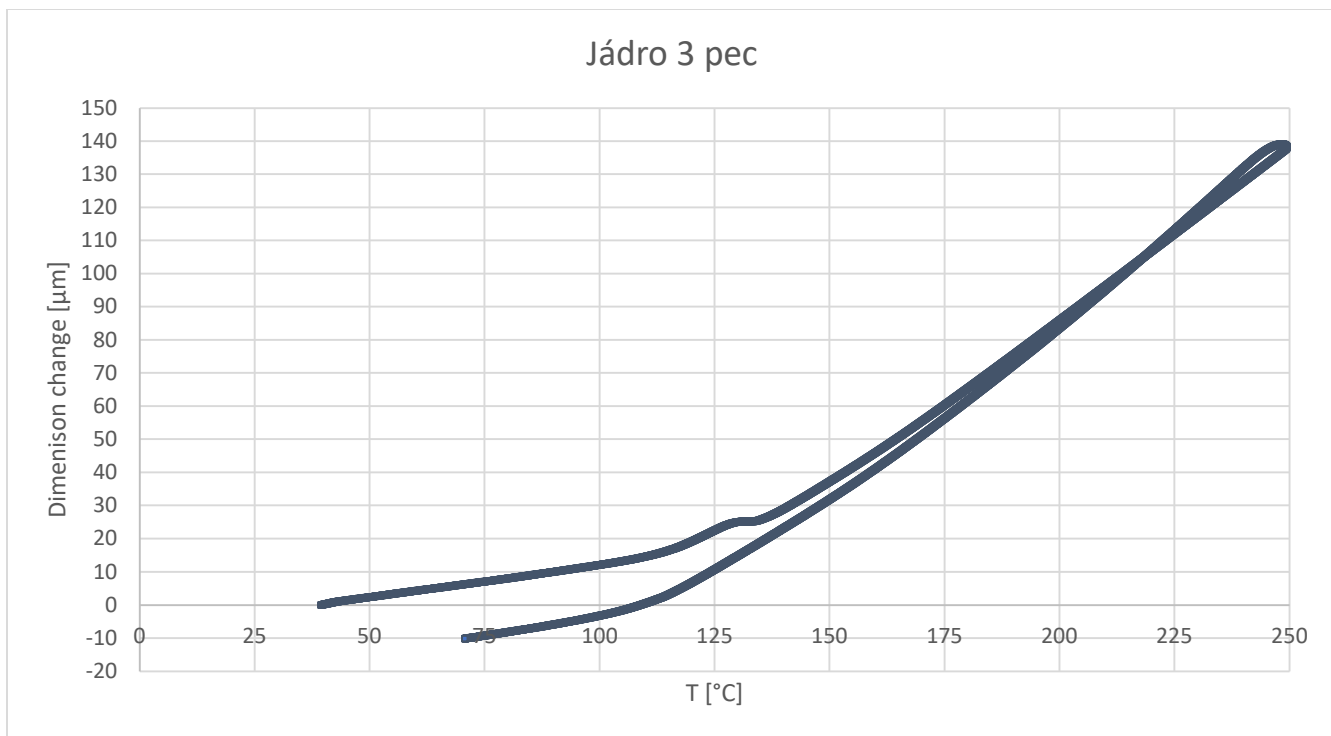
Vzorek Jádro 2 pec má opět hladký průběh bez peaků. Teplota skelného přechodu je v tomto případě okolo 130 °C. Tudiž opět o něco vyšší po vytvrzení v peci oproti vzorku Jádro 2. Vzorek se nejprve při zahřátí roztáhl o 93 μm a následně zmenšil při chladnutí o 97 μm.



**Graf 6 - Průběh termomechanické analýzy vzorku Jádro 3**

Graf pro vzorek Jádro 3 nám ukazuje, že vzorek se roztáhl při zahřívání 132  $\mu\text{m}$  a při chladnutí se zmenšil o 147  $\mu\text{m}$ . Oproti své původní velikosti byl po celém procesu o 15  $\mu\text{m}$  menší. To mohlo být opět způsobeno vytvrzením epoxidu.

Co se týče teploty skelného přechodu, ta je kolem hodnoty 130  $^{\circ}\text{C}$ , což je téměř o 20  $^{\circ}\text{C}$  nižší hodnota, než udává výrobce. Změna by mohla být způsobena navrstvením 3 jader na sebe a jejich proložením prepregy. Tato chyba však byla spíše způsobena záměnou materiálu výrobce DPS.

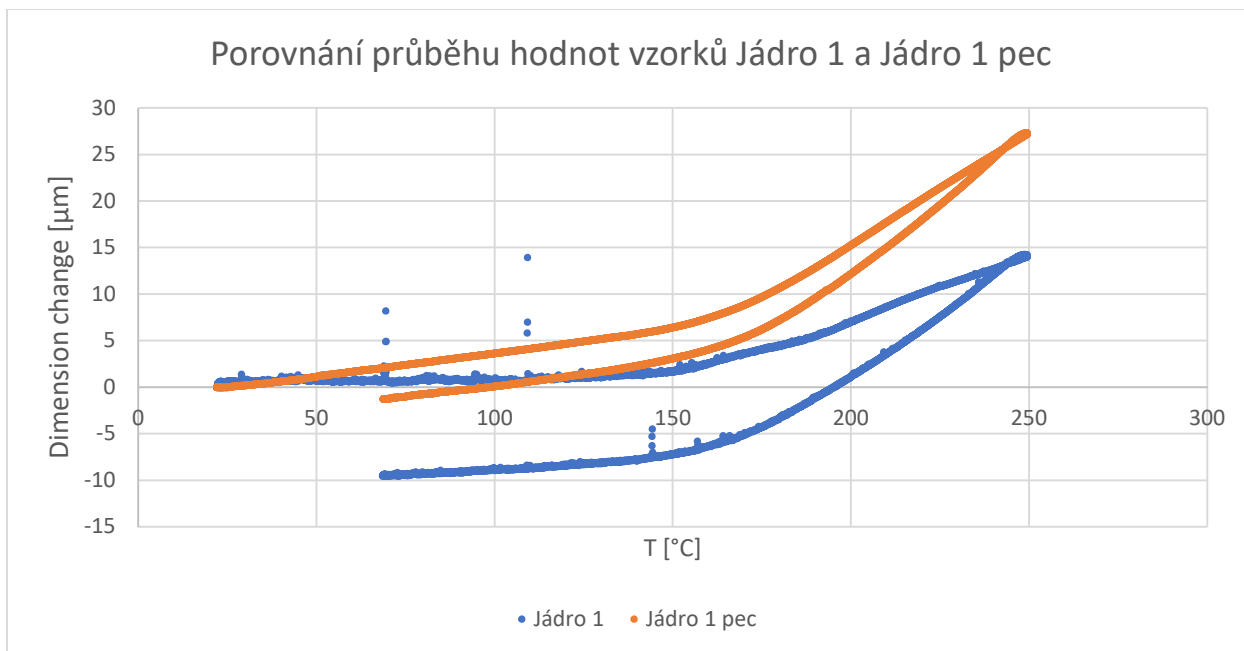


**Graf 7 - Průběh termomechanické analýzy vzorku Jádro 3 pec**

Vzorek Jádro 3 pec se při zahřátí roztáhl o 140 μm, poté se při ochlazování zmenšil o 150 μm. Vykazuje tak největší změnu ze všech. Po vychladnutí byl jeho rozměr o 10 μm menší než před měřením.

Teplota skelného přechodu je v tomto případě 135 °C a opět se tak liší od hodnoty udávané výrobcem.





**Graf 8 - Porovnání průběhu hodnot vzorků Jádro 1 a Jádro 1 pec**

Ve výše uvedeném grafu můžeme vidět porovnání dvou průběhů. Tyto dva vzorky byly vybrány z důvodu, že jsou ze stejného materiálu, mají stejnou skladbu a jediný rozdíl je předchozí tepelné zatížení vzorku průchodem průběžnou pecí - Jádro 1 pec. Lze tak přímo pozorovat vliv teplotního zatížení, kterému je deska vystavena během přetavování pájky typu SAC.

Vzorek Jádro 1 pec se roztáhl téměř dvakrát více nežli druhý. Důvodem je, že při teplotním zatížení došlo k dovytvrzení pryskyřice. Ta už při zahřívání během měřícího procesu nezmenšovala svůj objem, a tak se vzorek roztahoval více.

Dovytvrzením během měření se vzorek Jádro 1 zmenšil o 9 μm a vzorek Jádro 1 pec 1 μm. Tento fakt podporuje výše uvedené tvrzení dovytvrzení pryskyřice.

Průběh hodnot vzorku Jádro 1 pec je také hladší a nevykazuje rušení. Důvodem je, že vzorky byly měřeny v různé dny a při měření vzorku Jádro 1 byl v místnosti větší provoz a odsouvání židlí a dosedání na ně způsobovalo nežádoucí rušení. Během měření vzorku Jádro 1 pec byl již termomechanický analyzátor umístěn na antivibračním stole, který pohlcoval otřesy.

## 4.5 Porovnání výsledků

Vzorky budou porovnány pomocí tabulky, ve které lze nalézt následující údaje:

- $l_0$  [mm] – počáteční velikost vzorku
- $\Delta l$  zahřívání [ $\mu\text{m}$ ] – změna rozměrů vzorku při zahřívání na teplotu 250 °C
- $\Delta l_{\text{final}}$  [ $\mu\text{m}$ ] – konečná změna velikosti vzorku po vychladnutí na 60 °C
- $\Delta l_{\text{max}}$  [ $\mu\text{m}$ ] – maximální změna velikosti vzorku během procesu
- $T_g$  [°C] – teplota skelného přechodu

Z naměřených dat jsem odečetl a dopočítal následující hodnoty:

| Název vzorku | $l_0$ [mm] | $\Delta l$ zahřívání [ $\mu\text{m}$ ] | $\Delta l_{\text{final}}$ [ $\mu\text{m}$ ] | $\Delta l_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ] | $T_g$ [°C] |
|--------------|------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|
| Jádro 1      | 1,0552     | 14,14                                  | -9,51                                       | 23,65                                     | 150        |
| Jádro 2      | 2,0909     | 98,79                                  | 1,26                                        | 98,79                                     | 130        |
| Jádro 3      | 3,1962     | 130,04                                 | -17,12                                      | 147,16                                    | 130        |
| Jádro 1 pec  | 1,0248     | 27,19                                  | -1,25                                       | 28,44                                     | 160        |
| Jádro 2 pec  | 2,0991     | 91,74                                  | -4,41                                       | 96,15                                     | 130        |
| Jádro 3 pec  | 3,1913     | 139,09                                 | -10,05                                      | 149,14                                    | 135        |

*Tabulka 5 - Data odečtená a vypočítaná z naměřených hodnot*

### Porovnání koeficientů teplotní roztažnosti

Teplotní roztažnost byla vypočítána ze vztahu:

$$\alpha = \frac{dl}{l} \frac{1}{dt} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (1)$$

#### ***Rovnice 1 - Výpočet koeficientu teplotní roztažnosti [22]***

Kde  $l$  je délka,  $dl$  je změna délky a  $dt$  vyjadřuje změnu teploty.

U každého vzorku lze dopočítat 4 koeficienty teplotní roztažnosti. Nejprve počítáme v oblasti při zahřívání do teploty skelného přechodu  $\alpha_1$ , následně od teploty skelného přechodu do maximální teploty  $\alpha_2$ . Poté během ochlazování do bodu, kdy se mění sklon ochlazovacího průběhu  $\alpha_3$  a poslední část od tohoto místa do úplného vychladnutí.

Z naměřených grafů bylo možné odečíst následující hodnoty.

**Tabulka 6 - Hodnoty odečtené z naměřených průběhů**

| Název vzorku | $T_{poč}$ [°C] | $T_g$ [°C] | $T_{max}$ [°C] | $T_{gchlاد}$ [°C] | $T_{konec}$ [°C] | $l_0$ [mm] | $\Delta l_1$ [μm] | $\Delta l_2$ [μm] | $\Delta l_3$ [μm] | $\Delta l_4$ [μm] |
|--------------|----------------|------------|----------------|-------------------|------------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Jádro 1      | 23             | 150        | 250            | 170               | 60               | 1,0552     | 2,4               | 12,6              | 22,2              | 3,3               |
| Jádro 2      | 36             | 130        | 250            | 120               | 60               | 2,0909     | 23,1              | 76,9              | 90,5              | 6,9               |
| Jádro 3      | 23             | 130        | 250            | 120               | 60               | 3,1962     | 26,9              | 103,1             | 130,5             | 16,1              |
| Jádro 1 pec  | 23             | 160        | 250            | 175               | 60               | 1,0248     | 7,1               | 19,8              | 20,3              | 7,5               |
| Jádro 2 pec  | 35             | 130        | 250            | 115               | 60               | 2,0991     | 15,2              | 75,8              | 88,4              | 5,1               |
| Jádro 3 pec  | 40             | 135        | 250            | 120               | 60               | 3,1913     | 25,2              | 114,8             | 133,1             | 16,9              |

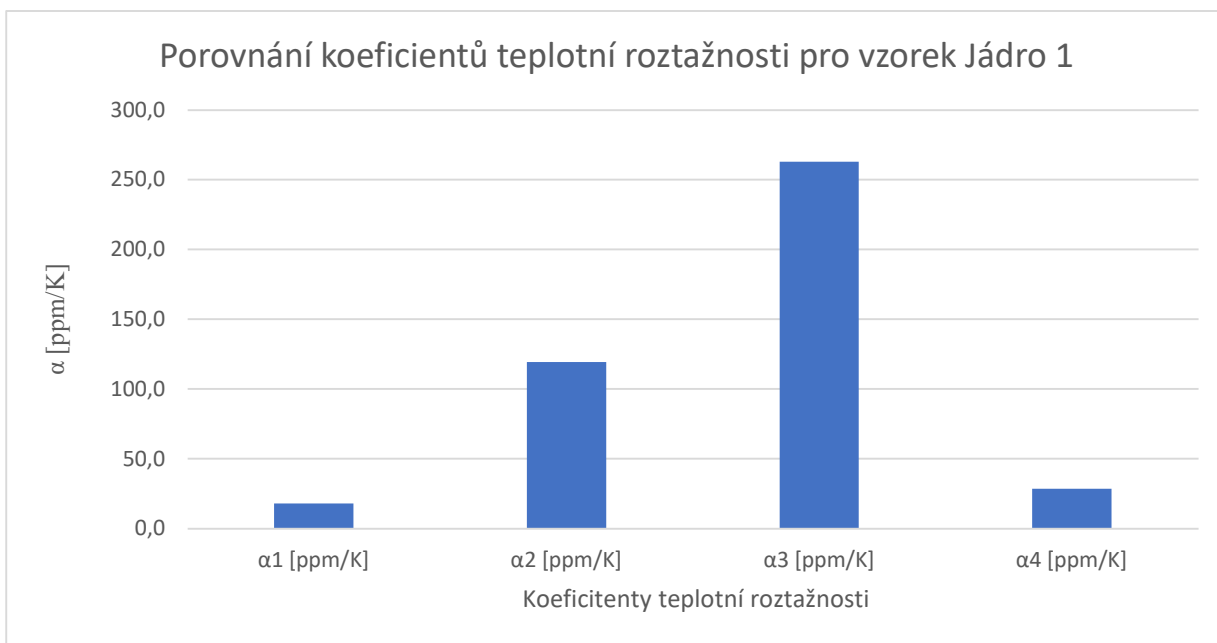
- $T_{poč}$  [°C] – počáteční teplota
- $T_g$  [°C] – teplota skelného přechodu
- $T_{max}$  [°C] – konečná teplota při zahřívání
- $T_{gchlاد}$  [°C] – zratelná změna sklonu křivky při procesu chlادnutí
- $T_{konec}$  [°C] – teplota vzorku na konci měření
- $l_0$  [mm] – počáteční délka vzorku
- $\Delta l_1$  [μm] – změna délky vzorku od počátku měření do teploty  $T_g$
- $\Delta l_2$  [μm] – změna délky vzorku od teploty  $T_g$  do  $T_{max}$
- $\Delta l_3$  [μm] – změna délky vzorku od teploty  $T_{max}$  do  $T_{gchlاد}$
- $\Delta l_4$  [μm] – změna délky vzorku od  $T_{gchlاد}$  do  $T_{konec}$

Z těchto hodnot bylo možné dopočítat 4 výše zmíněné koeficienty teplotní roztažnosti:

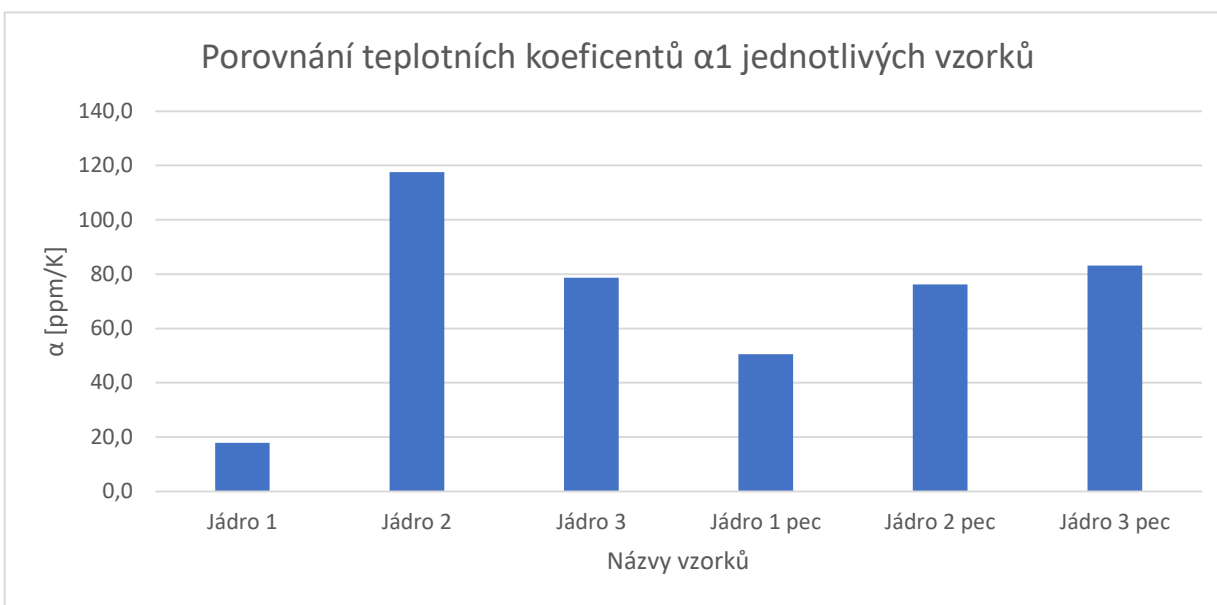
**Tabulka 7- Vypočtené hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti**

| Název vzorku | $\alpha_1$ [ppm/K] | $\alpha_2$ [ppm/K] | $\alpha_3$ [ppm/K] | $\alpha_4$ [ppm/K] |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Jádro 1      | 17,9               | 119,4              | 263,0              | 28,4               |
| Jádro 2      | 117,5              | 306,5              | 332,9              | 55,0               |
| Jádro 3      | 78,7               | 268,8              | 314,1              | 84,0               |
| Jádro 1 pec  | 50,6               | 214,7              | 264,1              | 63,6               |
| Jádro 2 pec  | 76,2               | 300,9              | 312,0              | 44,2               |
| Jádro 3 pec  | 83,1               | 312,8              | 320,8              | 88,3               |

Ani jeden vzorek přesně nespĺňuje data uvedená výrobcem, který udává hodnoty pro  $\alpha_1=50$ [ppm/K] a  $\alpha_2=250$ [ppm/K]. Z tohoto pohledu se nejvíce přibližuje vzorek Jádro 3.



**Graf 9 - Porovnání koeficientů teplotní roztažnosti pro vzorek Jádru 1**



**Graf 10 - Porovnání teplotního koeficientu  $\alpha_1$  pro jednotlivé vzorky**

## 4.6 Zhodnocení praktické části

Praktická část byla zaměřena na měření vlastností různých modifikací substrátu. Vzorky se lišily jak množstvím jader, tak také tím, že některé byly předem tepelně zatížené v horkovzdušné peci.

Z naměřených dat vidíme, že nejméně se roztáhlo Jádru 1, které předtím neprošlo žádným zatížením a roztáhlo se o 14,14  $\mu\text{m}$ . Oproti tomu vzorek Jádru 1 pec se při testování roztáhl o 27,19  $\mu\text{m}$ , což je hodnota téměř dvojnásobná. Tento jev bych přisuzoval tomu, že během testu se Jádru 1 zahřívalo a tím docházelo k dovytvrzování obsažené epoxidové pryskyřice a tím tedy ke zpomalení expanze materiálu. U vzorku Jádru 1 pec se epoxidová pryskyřice dovytvdila již během zahřátí v horkovzdušné peci a během samotného testu již expanzi nebrzdila. Pokud porovnááme z tohoto hlediska ostatní vzorky se stejným počtem jader lišícím se pouze zatížením v peci, roztáhly se téměř stejně. Důvodem této změny může být buď přítomnost prepregů mezi jednotlivými jádry, nebo záměna materiálu ve fabrice.

Pokud budeme hodnotit vzorky z pohledu jejich výsledné délky, lze vidět, že Jádru 1 se po testování zmenší o 9,51  $\mu\text{m}$  a Jádru 1 pec se zmenší o 1,25  $\mu\text{m}$  – tento jev opět přisuzuji dovytvrzení epoxidové pryskyřice, která při tomto procesu zmenší svůj objem. Stejnou vlastnost vykazuje i dvojice vzorků Jádru 3 a Jádru 3 pec, kdy se dříve tepelně zatížený vzorek zmenší méně. Co se týče dvojice Jádru 2 a Jádru 2 pec, zde vidíme opačný jev a Jádru 2 je dokonce po zahřátí o 1  $\mu\text{m}$  větší – to bych přisoudil nedostatečné době chlazení.

Největší délkové změny během procesu měření, tedy změřené hodnoty při teplotě 250 °C a poté při teplotě 60 °C na konci měření, dosahují vzorky Jádru 3 a Jádru 3 pec. Poté následují vzorky Jádru 2 a Jádru 2 pec. Nejmenší změnu vykazují materiály Jádru 1 a Jádru 1 pec. Tyto výsledky byly očekávány, jelikož vzorky s více jádry mají větší původní tloušťku, a tak se při stejném zahřátí roztáhnou více. Vložené prepregy určitě ovlivňují tuto roztažnost také.

Teplota skelného přechodu byla u všech vzorků rozdílná. Jediné jádro 1 dosahuje stejné hodnoty, jakou udává výrobce v technické specifikaci, tedy 150 °C. Lze pozorovat, že všechny dříve tepelně zatížené vzorky vykazují lehce vyšší teplotu skelného přechodu (5 až 10 °C) než vzorky nezatížené. U vícejaderných vzorků byla teplota skelného přechodu nižší v některých případech až o 25 °C. To by napovídalo tomu, že mohlo dojít opravdu k záměně materiálu a místo původního Isola IS400 byl dodán materiál Isola E-Cu quality 104, který má  $T_g$  roven 135 °C. [23]

Z vypočtených koeficientů teplotní roztažnosti lze jasně určit, že nejméně v porovnání se svou původní délkou se roztahuje vzorek Jádru 1 v oblasti od počátku do teploty skelného přechodu. Tento

materiál by byl nejlepší v místech, kde by se požadovalo nejmenšího zatížení pokovených otvorů. Naopak nejvíce se této oblasti roztahoval vzorek Jádru 2, který by pokovené otvory namáhal více a mohlo by dojít až k jejich prasknutí.

Největší změnu rozměru vykazovaly všechny materiály během procesu chladnutí v oblasti od maximální teploty do teploty  $T_g$  chlad. V této oblasti byly hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti i několikanásobně vyšší než v počáteční oblasti.

Lze dojít k závěru, že předchozí tepelné namáhání a počet jader či vložených prepregů značně ovlivňuje teplotní roztažnost desky plošného spoje. Při sériové výrobě je vždy důležité zkontrolovat si dodaný materiál s objednaným například pomocí mnou použité termomechanické analýzy a porovnat naměřená data s daty výrobce. Jedině tak se dá s naprostou jistotou potvrdit, že máme správný materiál a předejít chybám ve výrobě. Zároveň lze vidět, že vícejaderné desky se roztahují více, a proto musíme brát tento fakt v potaz u desek s pokovenými otvory elektricky spojující jednotlivá jádra.

Zajímavým zjištěním je také to, že vzorky prošlé pecí mají hladší průběh naměřených hodnot. Měření probíhalo v jiný den a v měřicí místnosti byl menší provoz. Stůl byl již v tuto dobu umístěn na antivibračním stole, který pohlcoval otřesy.

V praktické části bylo naplánováno porovnání většího množství vzorků. Výsledky by byly pak zajímavější. Také se vzorky mohly testovat při různých hodnotách parametru a zaměřit se na kusy vykazující neočekávané chování. Jelikož však byla škola uzavřena díky probíhající epidemii COVID19, musela být tato část zkrácena. Tímto bych chtěl ještě jednou poděkovat vedoucímu mé práce doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. díky jehož flexibilitě a ochotě mohla být práce změřena alespoň v tomto rozsahu.

## 5. Závěr

Práce byla zaměřena na vlastnosti desek plošných spojů. Nejprve jsem čtenářům přiblížil desku samotnou, používané materiály, či chyby, které mohou na desce vzniknout. V části praktické jsem popsal postup měření, použité vzorky a změřená data.

Teoretická část podrobně popisuje desku plošného spoje, její strukturu a vlastnosti, které jsou rozděleny na elektrické, mechanické a tepelné. Najdeme zde i základní používané materiály pro substráty DPS, mezi které patří substráty fenolické, epoxidové, kompozitní a skleněné, či keramické. Popsán je proces ručního i strojního pájení společně s používanými pájecími slitinami, tavidly a nejčastěji užívanými povrchovými úpravami jako jsou ENIG, HAL, OSP. Jedna celá kapitola je věnována vadám vznikajícím na DPS. Uvedeny jsou jejich příčiny a důsledky. Další kapitola udává, jaké metody užíváme pro hodnocení kvality.

Praktická část zkoumala vlastnosti DPS, zejména teplotní roztažnost. Nejprve jsem popsal měřicí pracoviště společně se všemi využívanými zařízeními. Poté jsem uvedl postup měření a uvedl rozdíly mezi jednotlivými vzorky. Ty se lišily v počtu na sebe vrstvených jader a tím, že jedna skupina byla před měřením tepelně zatížena v horkovzdušné peci.

Z naměřených hodnot je zřejmé, že teplotní roztažnost je ovlivňována počtem jader, přítomností prepregů i předchozím tepelným zatížením. Nejmenší změnu vykazoval vzorek Jádru 1 a naopak největší vzorek Jádru 3 pec. Teplota skelného přechodu se shodovala s daty výrobce, pouze u vzorku Jádru 1. U ostatních se hodnoty lišily.

Z vypočtených hodnot teplotní roztažnosti lze vidět, že materiál Jádru 1 je ze změřených vzorků jednoznačně nejlepší pro systémy, kde si nepřejeme příliš namáhat prokovy vlivem teplotní roztažnosti. Naopak nejhorší by bylo použití materiálu Jádru 2. Zde by byl prokov namáhán několikanásobně vyšší silou než v předchozím případě. Dále lze jednoznačně určit, že během procesu se vzorky nejméně, co se týče roztažnosti, namáhají v oblasti na začátku měření do teploty  $T_g$ . Největší změnu vzorky vykazují během první fáze chladnutí od maximální teploty to teploty  $T_g$  chlad.

Naměřená data nám poskytla zjištění, že mohlo dojít k záměně materiálu již ve výrobě, jelikož změřené teploty skelného přechodu ostatních vzorků se blížily spíše materiálu Isola E-Cu quality 104. Koeficienty teplotní roztažnosti byly také odlišné.

Praktická část by zasloužila více změřených vzorků, díky kterým bychom měli větší porovnání, a daly by se lépe proměřit další zajímavé výsledky. To ovšem nebylo možné vzhledem k aktuálně probíhající epidemii COVID19, díky které byly uzavřené vysoké školy po celé ČR a přístup do školních laboratoří byl omezen.

Na tuto práci by mohl navázat některý z dalších studentů a lépe proměřit jednotlivé vzorky a případně přidat další. Dal by se změřit vliv tloušťky prepregu či počtu jader na výslednou tepelnou roztažnost.

Dle mého je zajímavým zjištěním této práce fakt, že objednaný materiál se nemusí shodovat s dodaným z důvodu záměny například při výrobním procesu. Tuto záměnu je možné odhalit pomocí termomechanického analyzátoru, který jsem využíval ve své práci. Lze snadno změřit teplotu skelného přechodu, či koeficient teplotní roztažnosti v ose Z a odstranit tak chyby, které by mohly vzniknout při procesu výroby nebo samotného užívání DPS.



## 6. Seznam obrázků

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1 - Vývoj hustoty plošných spojů [1] .....                                   | 11 |
| Obr. 2 - Složení vícevrstvé desky plošných spojů [2] .....                        | 12 |
| Obr. 3 - Působení roztažnosti [1] .....                                           | 15 |
| Obr. 4 - Přehled složek základního materiálu [1] .....                            | 16 |
| Obr. 5 - Některé typy tuhých laminátů [1] .....                                   | 17 |
| Obr. 6 - Tvorba ručně pájeného spoje [11] .....                                   | 22 |
| Obr. 7 - Pájení vlnou [13] .....                                                  | 23 |
| Obr. 8 - Pájení infračerveným zářením [11] .....                                  | 25 |
| Obr. 9 - Konvekční pájení [11] .....                                              | 26 |
| Obr. 10 - Kontinuální pájení v parách (11) .....                                  | 26 |
| Obr. 11 - Závislost teploty tavení a teploty pájení na použité slitině [14] ..... | 29 |
| Obr. 12 - Příklad nesmáčivost [18] .....                                          | 33 |
| Obr. 13 - Příklad odsmaččení [18] .....                                           | 33 |
| Obr. 14 - Příklad kuličky pájky mimo pájecí plošku [18] .....                     | 34 |
| Obr. 15 - Nedostatečně přetavený spoj [10] .....                                  | 34 |
| Obr. 16 - Thombstoning [18] .....                                                 | 35 |
| Obr. 17 - Popcorn efekt [10] .....                                                | 35 |
| Obr. 18 - Vznik můstku [10] .....                                                 | 36 |
| Obr. 19 - Růst whiskerů [2] .....                                                 | 36 |
| Obr. 20 - Různé typy voidů [10] .....                                             | 37 |
| Obr. 21 - Prohnutí pouzdra [18] .....                                             | 37 |
| Obr. 22 - Pad cratering – trhlina skrz pájecí slitinu a vodivý motiv [25] .....   | 39 |
| Obr. 23 - Princip rentgenové kontroly [6] .....                                   | 41 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 24 - Snímek RTG metody kontrolovaného pouzdra součástky [16]..... | 42 |
| Obr. 25 - Snímek CT metody kontrolovaného pouzdra součástky [16] ..... | 42 |
| Obr. 26 - Laserová kontrola kvality spojů [6] .....                    | 43 |
| Obr. 27 - Statická testovací pole [6].....                             | 44 |
| Obr. 28 - Létaující testovací pole [6] .....                           | 44 |
| Obr. 29 – Profiloměr .....                                             | 45 |
| Obr. 30 - Horkovzdušná pec Mistral 260 [19] .....                      | 46 |
| Obr. 31 - Termomechanický analyzátor Q400 TMA [20] .....               | 46 |
| Obr. 32 - Tabulka vzorků .....                                         | 49 |
| Obr. 33 - Změna barvy po tepelném zatížení.....                        | 49 |
| Obr. 34 - Detail měřicí sondy a stage s vloženým vzorkem .....         | 50 |

## 7. Seznam tabulek

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1 – Vlastnosti substrátů [1] .....                          | 19 |
| Tabulka 2 – Vlastnosti prvků v pájkách [14].....                    | 27 |
| Tabulka 3 -Vlastnosti materiálu ISOLA IS400 [21].....               | 47 |
| Tabulka 4 - Seznam vzorků.....                                      | 48 |
| Tabulka 5 - Data odečtená a vypočítaná z naměřených hodnot .....    | 58 |
| Tabulka 6 - Hodnoty odečtené z naměřených průběhů .....             | 59 |
| Tabulka 7- Vypočtené hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti ..... | 59 |

## 8. Seznam rovnic

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Rovnice 1 - Výpočet koeficientu teplotní roztažnosti [22]..... | 58 |
|----------------------------------------------------------------|----|

## 9. Seznam grafů

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Graf 1 - Teplotní profil pro tepelné zatížení vzorků.....                         | 48 |
| Graf 2 - Průběh termomechanické analýzy vzorku Jádro 1 .....                      | 51 |
| Graf 3 - Průběh termomechanické analýzy vzorku Jádro 1 pec.....                   | 52 |
| Graf 4 - Průběh termomechanické analýzy vzorku Jádro 2 .....                      | 53 |
| Graf 5 - Průběh termomechanické analýzy vzorku Jádro 2 pec.....                   | 54 |
| Graf 6 - Průběh termomechanické analýzy vzorku Jádro 3 .....                      | 55 |
| Graf 7 - Průběh termomechanické analýzy vzorku Jádro 3 pec.....                   | 56 |
| Graf 8 - Porovnání průběhu hodnot vzorků Jádro 1 a Jádro 1 pec .....              | 57 |
| Graf 9 - Porovnání koeficientů teplotní roztažnosti pro vzorek Jádro 1.....       | 60 |
| Graf 10 - Porovnání teplotního koeficientu $\alpha_1$ pro jednotlivé vzorky ..... | 60 |

## 10. Seznam použité literatury

- [1] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdrění aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [2] BAUDYŠ, Dominik. *Spolehlivost prokovů u desek plošných spojů při pájení přetavením*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [3] KOSTKOVÁ, Jana. *Polymerní nanokompozity na bázi PMMA*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Vedoucí práce Josef Jančár.
- [4] LEA, C. *A Scientific Guide to Surface Mount Technology*. Ayr, 1988. ISBN 0-901150-22-3.
- [5] F. COOMBS Clyde. *Printed circuits handbook*. New York, 2008. ISBN 0-07-146734-3.
- [6] SLAVATA, Michal. *Možné chyby a kontrolní metody v elektrotechnické montáži*. Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [7] KOBLÍŽEK, Vilém. *Měkké pájení v elektronice* [online]. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: [http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13TEP\\_soubory/uloha\\_2.pdf](http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13TEP_soubory/uloha_2.pdf)
- [8] BESHAIJOVÁ-PELIKÁNOVÁ, Ivana. *Montáž SMT a THT – Pájení* [online]. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/pajeni.pdf>
- [9] Mistral 260 [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: [http://www.memtech.co.il/files/attach/Mistral\\_260.pdf](http://www.memtech.co.il/files/attach/Mistral_260.pdf)
- [10] KULHAVÝ, Jan. *Dutiny v pájených spojích*. Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [11] HINTERMÜLLER, Jan. *Vliv teplotního profilu u pájení přetavením na tvorbu intermetalických vrstev*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [12] FILÁKOVÁ, Denisa. *Technologie pájení přetavením*. Zlín, 2010. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Ústav elektroniky a měření. Vedoucí práce Petr Neumann.

- [13] MACH, Pavel. Pájení v elektrotechnice. [online]. [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/56864/mod\\_resource/content/1/P%C3%A1jen%C3%AD.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/56864/mod_resource/content/1/P%C3%A1jen%C3%AD.pdf)
- [14] PÍCHA, Jan. Studium spolehlivosti bezolovnatého pájených spojů. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ivan Szendiuch.
- [15] Kolektiv autorů. *Když optická inspekce nestačí...* [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:3748/kdyz-opticka-inspekce-nestaci>
- [16] Kolektiv autorů. *Možnosti využití RTG a CT diagnostiky (ne)jen v elektrotechnice – 2. část* [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:11952/moznosti-vyuziti-rtg-a-ct-diagnostiky-ne-jen-v-elektrotechnice-2-cast>
- [17] JIČÍNSKÝ, Jiří. *Enviromentální vlivy a pájitelnost povrchových úprav desek plošných spojů*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří Starý.
- [18] DURST, Pavel. *Pracoviště pro testování růstu dendritů*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [19] Mistral 260 Konvektions Reflowen [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.paggen.de/produkte/reflow-ofen-und-loeten/mistral-260-konvektionsreflowofen/>
- [20] Q400 TMA [online]. [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://www.tainstruments.com/q400/>
- [21] Isola IS400 [online]. [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://www.pragoboard.cz/is400>
- [22] Základní pojmy termodynamiky [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: [http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/teplotni\\_zmeny\\_latek.pdf](http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/teplotni_zmeny_latek.pdf)
- [23] Vlastnosti základních materiálů [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.pragoboard.cz/specifikace>
- [24] ŠEVČÍK, Jan. *Spolehlivost prokovů u desek plošných spojů*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [25] FROŠ, Denis. *Termomechanické zkoušky pájecích plošek*. Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí práce Karel Dušek.