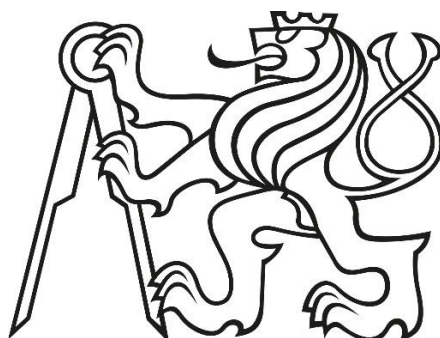


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



**Vliv prokovů na termomechanické vlastnosti desek plošných spojů**  
Influence of vias on thermomechanical properties of printed circuit boards

**Bakalářská práce**

Autor bakalářské práce: Radim Ille

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

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Praha 2020



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Ille	Jméno: Radim	Osobní číslo: 474421
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická		
Zadávací katedra/ústav:	Katedra elektrotechnologie		
Studijní program:	Elektrotechnika, energetika a management		
Studijní obor:	Aplikovaná elektrotechnika		

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv prokůvů na termomechanické vlastnosti desek plošných spojů

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of vias on thermomechanical properties of printed circuit boards

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s materiály a výrobou desek plošných spojů.
- 2) U vybraných desek plošných spojů proveďte analýzu termomechanického chování s ohledem na přítomnost prokůvů.
- 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 Ďurišin, and Pavel Mach, Diagnostika a optimalizácia pou žitia ekologických materiálův pre vodivé spájanie v elektronike, 1. vydanie. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: 17.02.2020 Termín odevzdání bakalářské práce: 22.05.2020

Platnost zadání bakalářské práce: 19.02.2022

---

doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D. podpis děkana(ky)
--	-----------------------------------	--

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

---

Datum převzetí zadání	Podpis studenta
-----------------------	-----------------



## **Prohlášení**

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

V Praze, dne            2020

.....  
Radim Ille



# **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem prokovů na termomechanické vlastnosti desek plošných spojů (DPS). V teoretické části práce jsou popsány jednotlivé oblasti desek plošných spojů, jako jsou substráty, druhy, technologie výroby, technologie povrchových úprav a vady DPS. Experimentální část práce se zabývá porovnáním jednotlivých vzorků DPS s různým počtem a rozmístěním prokovů, které byly vystaveny termomechanické analýze. Vzorky jsou porovnány z hlediska termomechanických vlastností.

## **Klíčová slova**

Desky plošných spojů, prokovy, termomechanické vlastnosti DPS, koeficient teplotní roztažnosti.

## **Annotation**

This bachelor thesis deals with the influence of vias on thermomechanical properties of printed circuit boards (PCB). The theoretical part of the thesis describes the individual areas of printed circuit boards, such as substrates, types, production technology, surface treatment technology and PCB defects. The experimental part of the work deals with the comparison of individual PCB samples with different number and distribution of penetrations, which were subjected to thermomechanical analysis. The samples are compared in terms of thermomechanical properties.

## **Key words**

Printed circuit boards, vias, thermomechanical properties, coefficient of thermal expansion.





# **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Karlovi Duškovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, připomínky a pomoc při zpracování této práce.



## Obsah

Úvod.....	11
1) Teoretická část .....	12
1.1 Funkce DPS.....	12
1.2 Výhody a nevýhody DPS .....	12
1.3 Substráty pro DPS.....	13
1.3.1 Vlastnosti substrátů pro DPS.....	13
1.3.1.1 Elektrické vlastnosti .....	13
1.3.1.2 Tepelné vlastnosti .....	15
1.3.1.3 Termo - mechanické vlastnosti .....	16
1.3.2 Druhy substrátů .....	17
1.3.2.1 Organické substráty .....	18
1.3.2.1.1 Fenolitické substráty .....	18
1.3.2.1.2 Epoxidové substráty.....	19
1.3.2.1.3 Polymidové substráty.....	19
1.3.2.1.4 BT – epoxidové substráty .....	20
1.3.2.2 Kompozitové substráty .....	20
1.3.2.3 Anorganické substráty .....	21
1.3.2.3.1 Korundové substráty.....	21
1.3.2.3.2 Beryliové substráty.....	21
1.4 Druhy a technologie výroby DPS .....	22
1.4.1 Jednovrstvé DPS.....	22
1.4.1.1 Technologie výroby jednovrstvých DPS .....	22
1.4.2 Dvouvrstvé DPS.....	23
1.4.2.1 Technologie výroby dvouvrstvých DPS .....	23
1.4.3 Vícevrstvé DPS.....	26
1.4.3.1 Technologie výroby vícevrstvých DPS .....	26
1.6 Povrchové úpravy vodivých cest .....	27
1.6.1 Technologie HAL (Hot Air Levelling).....	28
1.6.2 Technologie OSP (Organic Surface Protectives).....	29
1.6.3 ImSn (Imersní cín) .....	30
1.6.4 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold) .....	31
1.7 Vady DPS.....	32
1.7.1 Vady způsobené chybnou opravou zkratů.....	32
1.7.2 Přítomnost nečistot v desce.....	33

1.7.3 Souosost děr.....	34
1.7.4 Špatné pokovení otvorů .....	35
1.7.5 Delaminace.....	36
2) Experimentální část.....	37
2.1 Termomechanická analýza .....	37
2.2 Vzorky.....	39
2.3 Naměřená a vypočítaná data.....	41
2.3.1 První sada vzorků.....	44
2.3.1.1 Vzorek 1.1.....	44
2.3.1.2 Vzorek 2.1.....	45
2.3.1.3 Vzorek 3.1.....	46
2.3.2 Druhá sada vzorků (vzorky, které prošly před měřením pecí) .....	47
2.3.2.1 Vzorek 1.2.....	47
2.3.2.2 Vzorek 2.2.....	48
2.3.2.3 Vzorek 3.2.....	49
2.3.3 Porovnání první a druhé sady vzorků.....	49
2.3.3.1 Porovnání vzorků 1.1 a 1.2 .....	50
2.3.3.2 Porovnání vzorků 2.1 a 2.2 .....	51
2.3.3.3 Porovnání vzorků 3.1 a 3.2 .....	52
2.3.4 Vliv prokovů na roztažnost DPS.....	53
2.3.4.1 Vzorek 3.1 – vzorek 1.1 .....	53
2.3.4.2 Vzorek 1.1 – vzorek 2.1 .....	54
2.3.4.3 Vzorek 3.2 – vzorek 1.2 .....	56
2.3.4.4 Vzorek 1.2 – vzorek 2.2 .....	57
3) Závěr.....	59
Seznam použité literatury a informačních zdrojů.....	61

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Působení roztažnosti [1] .....	16
Obrázek 2: Technologický postup pro pokovení desky a pokovení obrazce [1], [2].....	25
Obrázek 3: Postup výroby VV DPS [7] .....	26
Obrázek 4: Proces výroby HAL [12].....	28
Obrázek 5: Typický vzhled pokoveného otvoru s HALem [7].....	28
Obrázek 6: Struktura OSP [7] .....	29
Obrázek 7: Fixace OSP na měděný povrch [7] .....	29
Obrázek 8: Postup výroby OSP [12] .....	29
Obrázek 9: Postup výroby ImSn [12].....	30
Obrázek 10: Vliv teploty na růst intermetalické vrstvy [10] .....	30
Obrázek 11: Imerzní pokovení mědi zlatem [10] .....	31
Obrázek 12: Postup výroby ENIG [12].....	31
Obrázek 13: Poškození otvoru [15].....	32
Obrázek 14: Příklad přijatelné nečistoty [2].....	33
Obrázek 15: Požadovaná sousost otvorů [2] .....	34
Obrázek 16: Přijatelná sousost otvorů [2] .....	34
Obrázek 17: Nepřijatelná sousost otvorů [2].....	34
Obrázek 18: Nedostatečné napojení mědi v otvoru na vnitřní vrstvy [16].....	35
Obrázek 19: Změna barvy desky v oblasti delaminace [17].....	36
Obrázek 20: Typy sond používaných při TMA [18].....	37
Obrázek 21: Termomechanický analyzátor Q400 [19].....	38
Obrázek 22: Měřené vzorky .....	39
Obrázek 23: Pájecí pec Mistral 260.....	39
Obrázek 24: Teoretický průběh $\Delta l = f(T)$ .....	41
Obrázek 25: Detail požadovaných parametrů .....	42
Obrázek 26: Náčrtek vzájemné polohy měřicí sondy a prokovů.....	46

## Seznam grafů

Graf 1: Průběh teplotního profilu .....	40
Graf 2: Porovnání vzorků 1.1 a 1.2.....	50
Graf 3: Porovnání vzorků 2.1 a 2.2.....	51
Graf 4: Porovnání vzorků 3.1 a 3.2.....	52
Graf 5: Závislost změny rozměru $\Delta l$ na změně teploty T pro vzorky 3.1 a 1.1.....	53
Graf 6: Výsledek rozdílu vzorek 3.1 – vzorek 1.1 .....	53
Graf 7: Závislost změny rozměru $\Delta l$ na změně teploty T pro vzorky 1.1 a 2.1 .....	54
Graf 8: Výsledek rozdílu vzorek 1.1 – vzorek 2.1 .....	55
Graf 9: Závislost změny rozměru $\Delta l$ na změně teploty T pro vzorky 3.2 a 1.2 .....	56
Graf 10: Výsledek rozdílu vzorek 3.2 – vzorek 1.2 .....	56
Graf 11: Závislost změny rozměru $\Delta l$ na změně teploty T pro vzorky 1.2 a 2.2.....	57
Graf 12: : Výsledek rozdílu vzorek 1.1 – vzorek 2.1 .....	58

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled některých výhod a nevýhod DPS [1].....	12
Tabulka 2: Přehled složek základního materiálu [1].....	17
Tabulka 3: Porovnání vlastností substrátů XXXPC, FR-4 a CEM - 1 [1], [7].....	20
Tabulka 4: Porovnání korundového a beryliového substrátu [7].....	21
Tabulka 5: Nastavené parametry .....	40
Tabulka 6: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro vzorek 1.1.....	44
Tabulka 7: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro vzorek 2.1.....	45
Tabulka 9: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro vzorek 3.1.....	46
Tabulka 10: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro vzorek 1.2.....	47
Tabulka 11: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro vzorek 2.2.....	48
Tabulka 13: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro vzorek 3.2.....	49
Tabulka 14: Porovnání vzorků 1.1 a 1.2 .....	50
Tabulka 15: Porovnání vzorků 2.1 a 2.2 .....	51
Tabulka 16: Porovnání vzorků 4.1 a 4.2 .....	52

## Seznam symbolů a zkratk

DPS - Deska plošných spojů

CTE - Coefficient of Thermal Expansion

Tg - Glass Transition Temperature

PTFE - Polytetrafluoretylen

SMD - Surface Mount Device

ZM - Základní materiál

VV - Vícevrstvé

HAL - Hot Air Leveling

ENIG - Electroless Nickel Immersion Gold

ImSn - Imersní cín

OSP - Organic Solderability Preservative

SMT - Surface mount technology

TMA - Termomechanická analýza

## Seznam rovnic

Vnitřní rezistivitu lze spočítat podle vzorce: (1).....	13
Povrchovou rezistivitu lze spočítat podle vzorce: (2) .....	14
Relativní permitivita je dána vztahem: (3) .....	14
Ztrátový činitel je dán vztahem: (4) .....	15
Součinitel tepelné vodivosti lze spočítat ze vzorce: (5) .....	15
Koeficient teplotní roztažnosti je dán vztahem: (6).....	43

## Seznam příloh

- Příloha 1: Grafická závislost  $\Delta l = f(T)$  pro vzorek 1.1
- Příloha 2: Grafická závislost  $\Delta l = f(T)$  pro vzorek 2.1
- Příloha 3: Grafická závislost  $\Delta l = f(T)$  pro vzorek 3.1
- Příloha 4: Grafická závislost  $\Delta l = f(T)$  pro vzorek 1.2
- Příloha 5: Grafická závislost  $\Delta l = f(T)$  pro vzorek 2.2
- Příloha 6: Grafická závislost  $\Delta l = f(T)$  pro vzorek 3.2





## Úvod

Asi žádný člověk si v současnosti neumí představit dnešní svět bez elektrické energie a bez elektronických či elektrotechnických zařízení, které lidem pomáhají a usnadňují život v mnoha ohledech. Důležitým stavebním prvkem těchto elektronických či elektrotechnických zařízení jsou desky plošných spojů, jinak také DPS. Bez těchto desek by bylo prakticky nemožné pomocí drátků propojovat stovky a tisíce vývodů, nemluvě o výhodě opakovatelnosti v sériové výrobě. Deska s plošnými spoji je výsledná deska, která obsahuje plošné vodiče, pájecí body a další prvky vodivého obrazce. Původně se vyráběly desky jednovrstvé. Ty bohužel po čase nesplňovaly požadavky na stále se zvětšující hustotu spojů a součástek. Tudíž se poněkud brzy přešlo k deskám dvouvrstevným. Ze začátku byl problém propojení obou dvou stran desky. Zpočátku byl tento problém řešen nýtky nebo drátky, ale brzy se z těchto metod přešlo na pokovené otvory, které řešily jak propojení, tak i uchycení vývodů součástek. Tyto pokovené otvory se v elektrotechnologické terminologii nazývají vias a pokovené otvory s průměrem menším než 150 $\mu$ m jsou označovány jako microvias, které se vyrábí například pomocí technologie laserů. Ovšem brzy kvůli potřebám nových obvodů nevyhovovalo ani toto provedení desek plošných spojů, a tak ke dvěma vrstvám přibyly další. Těmto deskám říkáme vícevrstvé desky plošných spojů, které si lze představit jako více na sobě poskládaných dvouvrstevných desek, které jsou od sebe odděleny tzv. prepregem (izolačním materiálem) a za tepla slisovány do výsledné desky. [1], [2], [3]

Tato práce je rozdělena na dvě části. První, rešeršní část, seznamuje čtenáře s problematikou desek plošných spojů. Konkrétně se zde věnují substrátům, které se používají k výrobě desek, a jejich vlastnostem. Dále je zde popsána samotná výroba, povrchové úpravy a vady DPS. Druhá, experimentální část, se zabývá měřením požadovaných vzorků na termomechanickém analyzáru. Naměřená data jsou následně vyhodnocena z pohledu termomechanických vlastností DPS.

## 1) Teoretická část

### 1.1 Funkce DPS

Desky plošných spojů mají široký rozsah funkcí, ale ve většině případů se uvádějí tyto tři hlavní funkce:

- 1) součástkám, které jsou na ní přidělaný DPS poskytuje mechanickou podporu,
- 2) pomocí vodičů, které jsou vytvořené na nosné desce, zajišťují vodivé spojení mezi jednotlivými součástkami,
- 3) zpravidla zajišťuje i označení součástek, jejich vývodů apod. [1]

### 1.2 Výhody a nevýhody DPS

Vysoká spolehlivost a nízká cena desek plošných spojů jsou dvě hlavní výhody, kterých je využíváno při hromadné výrobě DPS. Každý z nás nejspíš tuší, že nelze vytvořit systém, který by měl pouze samé klady a žádné zápory, tudíž i DPS mají své nevýhody. Seznam některých výhod a nevýhod desek plošných spojů si můžeme prohlédnout v tabulce 1. [1]

*Tabulka 1: Přehled některých výhod a nevýhod DPS [1]*

Výhody	Nevýhody
nízká hmotnost	velké finanční nároky na vyspělejší technologie výroby
ve většině případů snadná opravitelnost	složitost návrhu
jednoznačná poloha a přesné rozmístění součástek	nízká odolnost vůči vibracím a rázům
vypočtené charakteristiky obvodů dobře odpovídají realitě	
jednoduché a přesné dělení celku na části	
vysoká opakovatelnost parametrů	
výrobní proces je plně automatizovaný	
nejsou zde vysoké nároky na kvalifikovatelnost pracovníků	

## 1.3 Substráty pro DPS

Substráty (nebo také nosné podložky) jsou základními prvky elektronických systémů, proto je zapotřebí, aby korespondovaly s ostatními součástkami. Jejich hlavní funkcí je držet součástky, zprostředkovat propojení jejich vývodů a v neposlední řadě také odvést ztrátové teplo. [1]

### 1.3.1 Vlastnosti substrátů pro DPS

Aby substráty splňovaly předešlé požadavky, musí mít určité vlastnosti. Měly by obsahovat kvalitní izolant, který zajistí vzájemnou izolaci vývodů součástek, vhodný systém vodivých motivů pro spolehlivý rozvod elektrických signálů a dále by také substrát měl mít dobrou tepelnou vodivost, protože při průchodu elektrického proudu vzniká na součástkách, kterými proud prochází, teplo. Toto teplo je třeba ze součástek odvést a nedovolit, aby došlo k jejich přehřívání. Vlastností substrátů je mnoho ovšem zpravidla je můžeme rozdělit do tří hlavních skupin, které jsou podrobněji popsány dále. Nároky na vlastnosti výsledného substrátu se podle jeho následného použití liší, proto je zapotřebí si určit, které vlastnosti pro dané použití jsou důležitější. [1], [4]

#### 1.3.1.1 Elektrické vlastnosti

Nejdůležitější elektrickou vlastností substrátu je zcela určitě jeho **vnitřní a povrchová rezistivita**. Na vyšší hodnot těchto rezistivit se v dnešní době kladou větší a větší požadavky, a tak jejich hodnoty dosahují až  $10^{15} \Omega$  nebo  $\Omega \cdot \text{cm}$ . [1]

Vnitřní rezistivitu lze spočítat podle vzorce: 
$$\rho_i = \frac{E}{J_i}, \quad (1)$$

kde  $\rho_i$  je vnitřní rezistivita [ $\Omega \cdot \text{m}$ ],

$E$  je intenzita elektrického pole [ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ],

$J_i$  je proudová hustota uvnitř substrátu [ $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ].

Povrchovou rezistivitu lze spočítat podle vzorce:  $\rho_e = \frac{E}{J_e}$ , (2)

kde  $\rho_e$  je povrchová rezistivita [ $\Omega \cdot m$ ],

$E$  je intenzita elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ],

$J_e$  je proudová hustota na povrchu substrátu [ $A \cdot m^{-2}$ ].

Další důležitá elektrická vlastnost, která se u substrátů pozoruje je **relativní permitivita**. Relativní permitivita, dříve nazývaná dielektrická konstanta, je bezrozměrná veličina, vyjadřující míru polarizace daného materiálu. Polarizace vzniká silovým působením elektrického pole na vázané náboje v látce (dielektriku). Pokud se dielektrikum nenachází ve vnějším elektrickém poli, tak existují dvě možnosti rozmístění elektrických nábojů uvnitř dielektrika. V případě, že elektrické náboje vytváří elementární elektrické dipóly, tak mluvíme o polárním dielektriku. V opačném případě mluvíme o dielektriku nepolárním. Samotná polarizace nastává v okamžiku, kdy dielektrikum vložíme do elektrického pole. U nepolárních dielektrik dojde k posunu kladného náboje ve směru pole. U polárních dielektrik se působením elektrického pole na kladné a záporné konce dipólů vytvoří točivé momenty, které zapříčiní otočení dipólů o určitý úhel ve směru pole. Při polarizaci mají všechny dipóly v dielektriku (polárním i nepolárním) stejnou polaritu, která je opačná k polaritě vnějšího elektrického pole. Tudiž se velikost vnějšího elektrického pole zmenšuje. Velikost relativní permitivity vyjadřuje, kolikrát se zmenší velikost intenzity elektrického pole dielektrika nacházejícího se v látkovém prostředí místo ve vakuu. [4], [5]

Relativní permitivita je dána vztahem:  $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ , (3)

kde  $\epsilon_r$  je relativní permitivita [-],

$\epsilon$  je absolutní permitivita [ $F \cdot m^{-1}$ ],

$\epsilon_0$  je permitivita vakua (konstanta) a je rovna  $8,854187818 \cdot 10^{-12}$  [ $F \cdot m^{-1}$ ].

**Ztrátový činitel** je bezrozměrná elektrická veličina vyjadřující míru dielektrických ztrát. Tyto ztráty označují část elektrické energie, která se při působení elektrického pole přeměňuje v teplo. Z pohledu fyzikální podstaty se dielektrické ztráty v dielektriku dělí na ztráty ionizační, polarizační a vodivostní. Stejně jako relativní permitivita je i ztrátový činitel závislý na frekvenci. [4], [5]

Ztrátový činitel je dán vztahem: 
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_{\text{c}}}{I_{\text{j}}}, \quad (4)$$

kde  $\operatorname{tg} \delta$  je ztrátový činitel [-],

$I_{\text{c}}$  je činná složka proudu I [A],

$I_{\text{j}}$  je jalová složka proudu I [A].

### 1.3.1.2 Tepelné vlastnosti

Během procesu pájení součástek na desku plošného spoje je substrát vystaven kontaktu s roztavenou pájkou. Teplota roztavené pájky nesmí substrát poškodit, tudíž musí mít velkou **tepelnou odolnost**. Jak už bylo zmíněno, tak průchod elektrického proudu je doprovázen vznikem tepla. To je třeba ze součástek odvést, protože výstupní funkce mnoha součástek se s teplotou mění. Můžeme tedy říci, že vlastnosti součástek jsou závislé na provozní teplotě. Proto je třeba teplo odvádět a udržovat součástku v optimálním tepelném režimu. Důležitější veličinou je tedy **tepelná vodivost**, která označuje schopnost příslušné látky vést teplo. Pokud tedy má substrát odvádět teplo ze součástek co nejrychleji, musí mít co nejvyšší tepelnou vodivost. Tepelná vodivost je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti. [1], [4]

Součinitel tepelné vodivosti lze spočítat ze vzorce: 
$$\lambda = - \frac{g}{\operatorname{grad} T}, \quad (5)$$

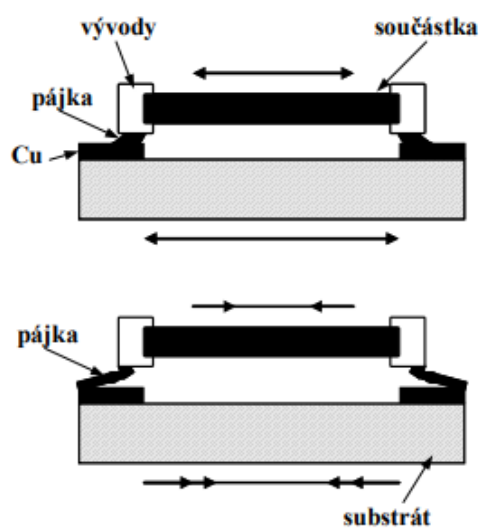
kde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],

$g$  je hustota tepelného toku [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ],

$\operatorname{grad} T$  je gradient teploty [K].

### 1.3.1.3 Termo - mechanické vlastnosti

Substráty by měly mít dobré mechanické vlastnosti, jako jsou například pevnost, nehořlavost, stálost rozměrů, rovinnost povrchu, odolnost vůči výrobním a provozním prostředím apod. Ovšem jedna z nejdůležitějších vlastností substrátu je jeho tepelná roztažnost, respektive kompatibilita tepelné roztažnosti substrátu a součástky. Koeficient, který nám tuto problematiku popisuje se nazývá **koeficient teplotní roztažnosti (CTE)  $\alpha$** . Koeficient  $\alpha$  bývá ve většině případů větší u substrátů než u mědi, ze které jsou vyrobeny pokovené otvory. K výrazným změnám tohoto koeficientu dochází při tzv. **teplotě skelného přechodu  $T_g$** , při které přechází deska ze sklovitého do kaučukovitého stavu. Roztažnost substrátu se nejvíce projeví v ose Z, v osách X a Y je roztažnost zmírněna vlivem výztuže ze skelné tkaniny. Při změně teploty vlivem rozdílných koeficientů teplotní roztažnosti desky a součástek, dochází k pnutí, které může mít za následek prohnutí či zkroucení desky. Tato deformace desky může následně poškodit vodivý motiv nebo například pájecí plošky s již připájenými součástkami. V případě součástek, které obsahují své vlastní vývody, které se dále strčí do pokovených otvorů na desce, není situace nějak kritická, jelikož pružné vývody eliminují rozdíly roztažnosti celkem snadno. Pokud se ovšem nacházíme v povrchové montáži, tak tam už to tak snadné není. Zde máme minimální vrstvu vodivého spoje a velmi malý kontakt mezi součástkou a substrátem. Příklad můžeme vidět na obrázku 1. [1], [4], [6]



Obrázek 1: Působení roztažnosti [1]

### 1.3.2 Druhy substrátů

Nejčastěji používaným základním materiálem je dielektrikum, které je buď jednostranně, nebo oboustranně plátované vodivou folií. Dielektrikum je nejčastěji složeno z pryskyřičného základu a bývá vyztuženo jednou nebo více vrstvami výztuže. Substráty se používají na zhotovení vodivého motivu a slouží k montáži elektronických součástek. Přehled složek základního materiálu si můžeme prohlédnout v tabulce 2. [1], [7]

*Tabulka 2: Přehled složek základního materiálu [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	polymid	nikl/měď
křemenné sklo	kyanatan esteru	
aramidová tkanina	PTFE	
netkané aramidové vlákno	polyester	
lehčená PTFE tkanina	melamin	
kevlarové vlákno		
skelná rohož		

### 1.3.2.1 Organické substráty

Tento druh substrátů se skládá z výztuže (případně bez výztuže) a organických pryskyřic. V případě zhotovení vodivých motivů subtraktivní technologií bývá na substrát naplátována měděná folie. Pokud dochází ke zhotovení vodivých motivů technologií aditivní, tak podložka měděnou folii neobsahuje. Organické substráty dále dělíme podle tuhosti na ohebné (flexibilní) a neohebné. Ohebné substráty používají jako pojivo termoplasty, zatímco neohebné substráty využívají termosety. Neohebné organické substráty jsou v drtivé většině případů vyráběny z fenolické a epoxidové pryskyřice. [1], [8]

#### 1.3.2.1.1 Fenolické substráty

Většina fenolických laminátů používají jako výztuž papír. Tento druh substrátu se ještě dále dělí na několik typů, jako jsou například typy X, XX a XXX. Každý z těchto typů má v sobě určitý procentuální obsah pryskyřice. Pro již zmíněné druhy je to popořadě 35%, 45% a 58%. Nadále existují typy (XXXXP nebo XXXPC), do kterých se přidávají tzv. flexibilizátory, což jsou látky, které po zabudování do polymeru přispějí ke zvýšení jeho ohebnosti a pružnosti. Výroba probíhá kontinuálním impregnováním papíru v horizontální poloze, ve které setrvává za pomoci vzduchového polštáře. Následně projde vrstva impregnovaných listů procesem lisování (za tepla), vytvrzení a plátování měděnou folií do desek, které mají rozměry okolo 1 m x 1 m. Výhodou těchto substrátů je nízká cena, dále pak dobré elektrické vlastnosti nebo dobrá opracovatelnost. Nevýhodou je nízká odolnost vůči elektrickému oblouku, velká navlhavost nebo horší teplotní odolnost. [1], [7]



### 1.3.2.1.2 Epoxidové substráty

Vlastnosti těchto substrátů jsou mnohem lepší než fenolických substrátů. Za každou výhodu se platí, a tudíž lze snadno usoudit, že tyto substráty budou dražší než substráty fenolické. Nejrozšířenější typ z této oblasti je FR-4, který se stal světovým standardem. K velkému pokroku přispělo zavedení nepájivé masky, díky které se zvýšila hustota vodivých motivů a zlepšila se ochrana před vlivy provozního prostředí. Vhodným výběrem a úpravou skelné tkaniny či vlákna lze dosáhnout lepších vlastností laminátu. Ve skutečnosti se ale sklo s epoxidovou pryskyřicí spojuje velmi těžko, proto je potřeba sklo upravovat do požadovaného stavu, na který epoxid dobře přilne. Při výrobě můžeme ovlivnit počet vrstev skelné tkaniny v laminátu. Obecně totiž platí pravidlo, čím více vrstev, tím kvalitnější materiál. Například laminát o tloušťce 1,5 mm má vrstev 8. Při výrobě skloepoxidového dielektrika dochází ke kontinuálnímu impregnování skelné tkaniny pryskyřicí v ponořovací nádobě. Dále je skelná tkanina sušena ve vertikální poloze. Při sušení dochází k částečnému vytvrzení pryskyřice. Tento materiál nyní nazýváme prepreg). V konečné fázi se navrství listy prepregu spolu se separačními listy, které mají za úkol oddělit jednotlivé desky a ve vyhřívacím lisu dochází k vytvrzení. Po laminaci se desky zaštrihnou na požadovanou velikost. Výhodou jsou dobré mechanické a elektrické vlastnosti. Při výrobě se totiž používají aditiva k modifikaci vlastností epoxidové pryskyřice, díky kterým má výsledný substrát vyšší teplotu skelného přechodu  $T_g$  a nižší koeficient teplotní roztažnosti  $\alpha$ . Nevýhodou je horší mechanické opracování a vyšší cena. [1], [7]

### 1.3.2.1.3 Polymidové substráty

Tento typ substrátu používá nejčastěji jako výztuž skleněnou či aramidovou tkaninu. Teplota skelného přechodu dosahuje hodnoty 260 °C, což je špička mezi používanými substráty pro DPS. Velkou výhodou těchto substrátů je, že do teploty 150 °C se jejich mechanické vlastnosti nemění a zůstávají konstantní. Díky své dobré odolnosti v teplotních cyklech jsou tyto substráty hojně využívány v leteckých aplikacích. Mezi nevýhody patří vysoká cena a vyšší navlhavost. [1], [7]

#### 1.3.2.1.4 BT – epoxidové substráty

BT – skloepoxidové lamináty mají smíchanou pryskyřičnou soustavu z bismaleimid-triazinu a epoxidu. Z tohoto důvodu dosahují tyto substráty velikosti teploty skelného přechodu 180 °C a vyšší. Tyto substráty jsou vhodné pro vysoko výkonové desky plošných spojů. Dále mají velké využití ve frekvenčních aplikacích pracujících v MHz rozsazích. [1], [7]

#### 1.3.2.2 Kompozitové substráty

Tyto substráty mají alespoň 2 materiály pro výztuže a jako pojivo využívají epoxidovou pryskyřici. Nejpoužívanějším kompozitním laminátem je v současné době CEM – 1. Ten je složen z jádra, kterým je v tomto případě papír impregnovaný epoxidem, pokrytým jednou vrstvou skloepoxidového prepregu po obou stranách. Výhodou tohoto laminátu je dobrá děrovatelnost a nízká cena. V některých aplikacích kompozitní substráty nahrazují i nejpoužívanější substrát FR-4. Jedná se hlavně o aplikace jednovrstvých plošných spojů (např. autorádia). Je to hlavně z důvodu nemožnosti pokovování kompozitního substrátu CEM – 1. [1], [4], [7]

Porovnání vlastností dvou zástupců organických substrátů a jednoho zástupce kompozitních substrátů můžeme vidět v tabulce 3. Je zde krásně vidět skutečnost, že materiál FR-4 má opravdu mnohem lepší vlastnosti než fenolický substrát (konkrétně XXXPC) a téměř shodné vlastnosti jako kompozitní substrát CEM – 1.

Tabulka 3: Porovnání vlastností substrátů XXXPC, FR-4 a CEM - 1 [1], [7]

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, [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]	$10^9$	$10^{12}$	$10^{12}$
Nasákavost vodou, [% váhy]	0,75	0,25	0,3
Elektrická pevnost, [kV]	15	40	40
Relativní permitivita, max. při 1 MHz, [-]	4,8	5,4	5
Ztrátový činitel, při 1 MHz, [-]	0,04	0,035	0,04
Teplota skelného přechodu, [°C]	105	130	130
Cenový faktor (FR-4=1)	0,5	1	0,85

### 1.3.2.3 Anorganické substráty

Substráty z této skupiny se od ostatních liší způsobem své výroby. Ta je totiž spojena s technologií tenkých nebo tlustých vrstev. Mezi přednosti anorganických substrátů patří vysoká tepelná odolnost, takže jsou schopné snést teplotu výpalu tlustých vrstev. Další výhodou je dobrá chemická odolnost a rozměrová stálost. Nevýhody těchto substrátů jsou například křehkost, toxicita některých typů, vyšší hmotnost a cena substrátů. Mezi nejčastější zástupce této skupiny substrátů patří korundová a beryliová keramika. [4], [7]

#### 1.3.2.3.1 Korundové substráty

Základním materiálem těchto substrátů je oxid hlinitý jinak zvaný také alumina. Pro dosažení požadovaných fyzikálních vlastností se do alumina přidává malé množství kovových oxidů. Koncentrace alumina se v korundové keramice pohybuje mezi 91 – 99,6 %. Vodivé motivy jsou realizovány pomocí tlustovrstvé či tenkovrstvé technologie. Tento typ substrátů je hojně využíván. Jejich největší nevýhodou je jejich křehkost. [4], [7]

#### 1.3.2.3.2 Beryliové substráty

Tento substrát je vyráběn z oxidu berylnatého. Pokud porovnáme oxid berylnatý s oxidem hlinitým, tak zjistíme, že sice oxid berylnatý má menší pevnost, ale má neobvykle vysokou hodnotu tepelné vodivosti (až 7x vyšší než alumina). Pro tuto vlastnost je ve velké míře používán ve výkonových obvodech, ale také v obvodech nízkých výkonů, kde je potřeba odvádět teplo. Kromě vysoké ceny mají tyto substráty nevýhodu v podobě toxicity. [1], [4]

Porovnání dvou právě popsaných anorganických substrátů (korundových a beryliových) si lze prohlédnout v tabulce 4.

Tabulka 4: Porovnání korundového a beryliového substrátu [7]

Vlastnosti	Korundový substrát	Beryliový substrát
Relativní permitivita, max. při 1 MHz [-]	9-10	6,5
Ztrátový činitel, při 1 MHz [-]	0,08	0,04
Tepelná vodivost [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	35	250
Ekologičnost materiálu [-]	vyhovuje	toxicita
Mechanická stabilita [-]	křehkost	křehkost

## 1.4 Druhy a technologie výroby DPS

Desky plošných spojů můžeme rozdělit podle kritéria počtu vrstev na jednovrstvé, dvouvrstvé a vícevrstvé.

V technologiích výroby desek plošných spojů se v drtivé většině případů používají chemické procesy. Tyto technologie jsou drahé, náročné a jsou na ně kladeny přísné požadavky ohledně ekologie. Nároky na hustotu propojení jsou stále větší, tím pádem se zmenšují izolační mezery a průměry otvorů. Naopak se zvyšuje počet vrstev vodivého motivu, který se ve většině případů vytváří fotocestou, což je osvit fotomasky přes matrici. [9]

### 1.4.1 Jednovrstvé DPS

Historicky nejstarší a také nejjednodušší plošné spoje jsou jednovrstvé. Tyto desky plošných spojů obsahují pouze jednu vrstvu propojovacích vodičů (spojů). Vyrábějí se bez pokovených otvorů a využití nalézají především v jednodušších aplikacích. Jednovrstvé DPS se osazují klasickými vývodovými součástkami (osazují se do vyvrtaných otvorů), nebo pomocí technologie SMD (osazují se ze strany spojů), případně můžeme použít kombinaci obou způsobů osazování. Vodivé motivy se na nich nejčastěji vytvářejí fotoprocem. [1]

#### 1.4.1.1 Technologie výroby jednovrstvých DPS

##### 1.4.1.1.1 Technologie sítotisku a leptání

V této technologii výroby se materiál nastříhá na přířezy, které musí splňovat podmínku, aby byly větší alespoň o jeden centimetr než výsledná deska. V dalším kroku se do přířezů vyvrtají nebo vylisují technologické otvory, které slouží k uchycení desky ve výrobních aplikacích. Následuje chemické a mechanické čištění. Během nich je deska zbavena prachu, mastnot, úlomků a následně vysušena. V další fázi je na desku pomocí sítotisku nanesen leptuodolný rezist ve tvaru výsledného vodivého motivu. Rezist se následně vytvrzuje. Následuje proces leptání, při kterém je odstraněna měď, jenž nebyla pokryta leptuodolným rezistem. V konečné fázi je z vodivých motivů smyt leptuodolný rezist a deska se opláchne, vysuší a mechanicky opracuje. [1], [8]

#### 1.4.1.1.2 Technologie fotoprocesu a leptání

Při této technologii se celá plocha desky ovrství fotocitlivým lakem (fotorezistem) a skrz filmovou matici se exponuje obrazec motivu na desku. Následuje proces vyvolání. Další postupy jsou stejné jako u sítotisku, leptání, sejmutí fotorezistu, mytí a sušení. [1], [8]

### 1.4.2 Dvouvrstvé DPS

U dvouvrstvých DPS byl největší problém v elektrickém spojení mezi oběma stranami substrátu. Z toho důvodu jsou na elektrické spojení kladeny základní požadavky, jako jsou například dobré elektrické spojení obou stran, dobré mechanické vlastnosti (zajišťující opětovné vkládání a vyjímání vývodů součástek) a akceptovatelná cena. V dnešní době se ke spojení obou dvou stran desky používají pokovené otvory, které také nejlépe splňují předešlé základní požadavky. Na osazování se používají jak vývodové, tak v poslední době především SMD součástky. Dvouvrstvé DPS se vyrábějí aditivními nebo subtraktivními metodami. U plátovaných substrátů rozeznáváme dvě základní metody výroby – pokovení obrazce (Pattern Plating) a pokovení desky (Panel Plating). [1], [8]

#### 1.4.2.1 Technologie výroby dvouvrstvých DPS

##### 1.4.2.1.1 Aditivní technologie

Tato technologie využívá k výrobě základní materiál bez měděné vrstvy. Následně po vyvrtání součástkových otvorů dochází k vytvoření vodivých cest nanášením kovové vrstvy, přičemž izolační mezery jsou maskovány. Hlavní výhodou této metody výroby je, že je ekologičtější, protože při ní nedochází k procesu leptání. [1], [9]

##### 1.4.2.1.2 Subtraktivní technologie

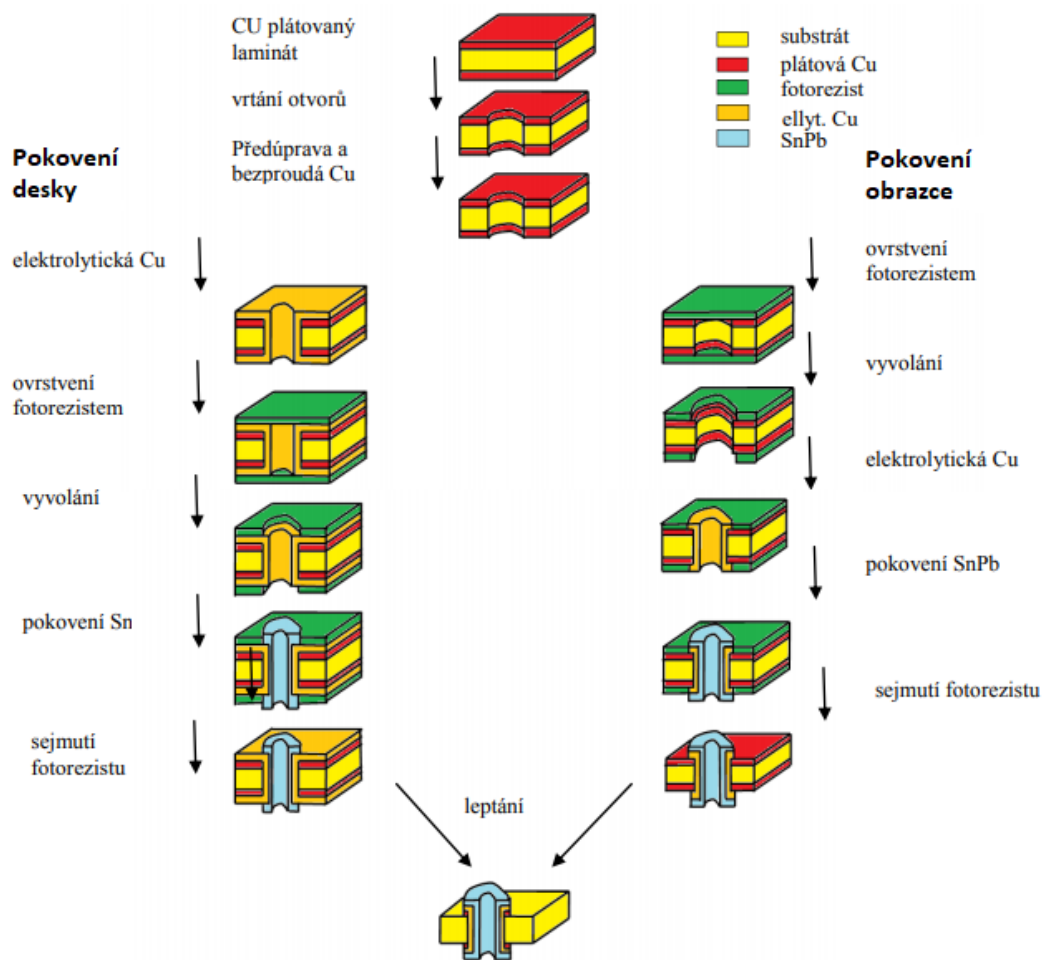
U této technologie se jako základní materiál využívá jednostranně, nebo oboustranně mědí plátovaný izolační materiál. Výsledných vodivých cest je dosaženo vyleptáním vodivého motivu přes leptuodolnou masku. [8], [9]

#### 1.4.2.1.3 Panel Plating (pokovení desky)

Oboustranně plátovaný materiál je nejprve bezproudově pokoven mědí. Následuje proces elektrolytického pokovení mědí. Dále dochází k úpravě povrchu a nanesení fotorezistu, který se přes filmovou matici obrazce osvítí. Osvícená místa fotorezistu se vytvrdí a zůstanou zde i po procesu vyvíjení, zatímco z neosvícených míst se fotorezist ve vývojce rozpustí. V dalším kroku je deska elektrolyticky pokovena Sn nebo SnPb, jehož vrstva působí jako (kovový) rezist při leptání. Dále dojde k rozpuštění fotorezistu, který bránil ovrstvení kovovým rezistem, čímž dojde k obnažení mědi, která je v další fázi odleptána. V této fázi výroby nám zůstává vodivý obrazec a otvory, pokryté kovovým rezistem, který je přes masku, chránící ukryté motivy, rozpuštěn v lázni. Výhodou této metody výroby je, že nemůže dojít ke kontaminaci z rezistu, neboť při procesu dochází k pokovení mědi. Hlavní nevýhodou je velká spotřeba leptadla, protože při výrobě dochází k pokrytí celého povrchu desky mědí. [1], [8]

#### 1.4.2.1.4 Pattern Plating (pokovení obrazce)

Při výrobě desek plošných spojů s pokovenými otvory je tato metoda užívanější. Nedochází zde totiž k pokovení celého povrchu, nýbrž k selektivnímu pokovení výsledného vodivého obrazce spojů. To nám zajistí nižší spotřebu leptadla, které by muselo být použito, kdyby došlo k pokovení celého povrchu. Samotná výroba probíhá trochu jinak než u metody Panel Plating. Nejprve dochází k nanesení, k osvícení, a nakonec k vyvolání fotorezistu. Následuje elektrolytické pokovení mědí a vodivý obrazec je pokryt kovovým rezistem. V konečné fázi je fotorezist odstraněn a odkrytá měď je odleptána. Výhodou této metody je použití menšího množství mědi či menší podleptání vodivých struktur. Naopak nevýhodou je například nebezpečí kontaminace mezi Cu a kovovým rezistem. [1]



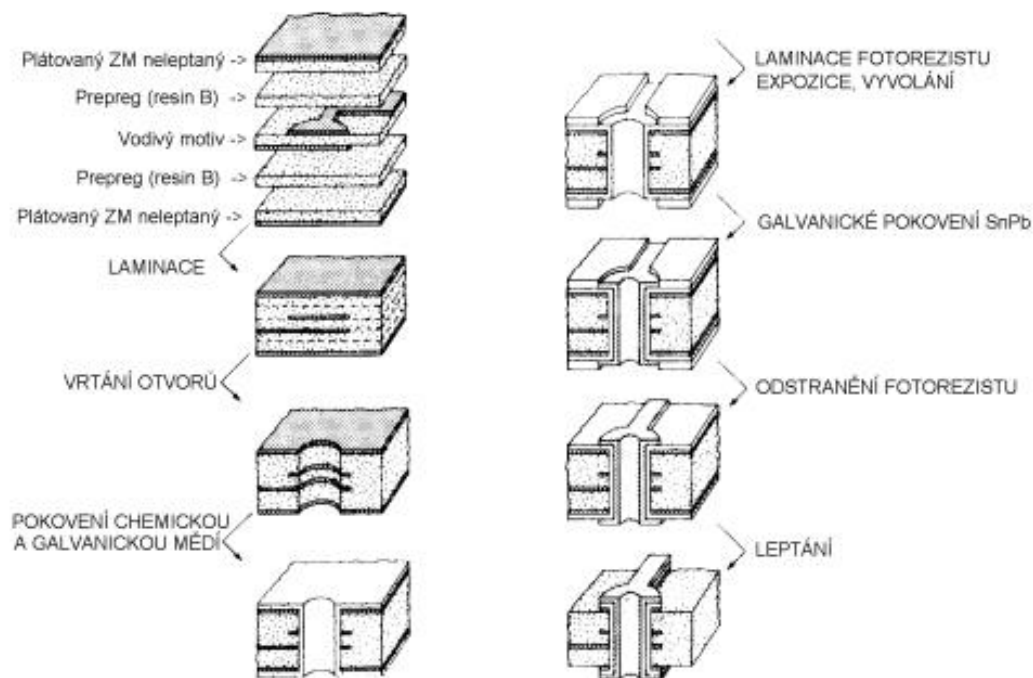
Obrázek 2: Technologický postup pro pokovení desky a pokovení obrazce [1], [2]

### 1.4.3 Vícevrstvé DPS

Vícevrstvé desky plošných spojů mají více než dvě vrstvy propojovacích vodičů. V dnešní době má vícevrstvý spoj alespoň 4 vrstvy. Dvě vrstvy jsou vnitřní a dvě vnější. Vnitřní vrstvy jsou po vytvoření vodivých obrazců zalisovány v samotné desce a často jsou používány jako napájecí. K propojení jednotlivých vrstev jsou používány pokovené otvory. Tyto desky se začaly vyrábět z důvodu potřeby větší hustoty propojení a vyšší rychlosti přenášených signálů. Osazení probíhá stejně jako v případě desek dvouvrstvých, takže buď součástkami vývodovými nebo technologií SMD. [1]

#### 1.4.3.1 Technologie výroby vícevrstvých DPS

Výroba těchto desek probíhá tak, že se nejprve vytvoří vodivé obrazce vnitřních vrstev na základní materiály a na vnější vrstvy je nanášena měděná fólie vhodné tloušťky. Tato soustava se dále jako celek slisuje pomocí lepících listů (prepregů). Celý proces výroby VV desek plošných spojů je znázorněn na obrázku 3. [1], [7]



Obrázek 3: Postup výroby VV DPS [7]



## 1.6 Povrchové úpravy vodivých cest

Vodivé cesty v deskách plošných spojů jsou ve většině případů vyrobeny z mědi, jejíž hlavní výhodou je výborná vodivost, ale má také jednu velkou nevýhodu, kterou je náchylnost ke korozi. Kvůli této nevýhodě se provádějí povrchové úpravy vodivých cest. Dále také za účelem zlepšení pájitelnosti pájecích plošek. Technologií, kterými lze docílit povrchové úpravy mědi je mnoho, a proto se zde budu zabývat jen těmi nejpoužívanějšími. Jednotlivé technologie povrchových úprav musí respektovat všeobecné požadavky: [10], [11]

- **materiálová kompatibilita**

Chemicko-fyzikální kompatibilita s měděným povrchem DPS, pod kterou si můžeme představit dobrou smáčivost povrchů nebo kompatibilitu s nepájivou maskou. [7], [12]

- **procesní kompatibilita**

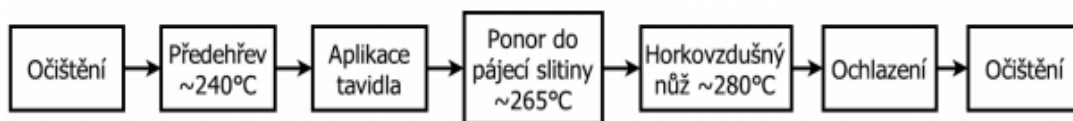
Tato kompatibilita by měla zajistit rovinnost povrchů, teplotní stres desky plošných spojů pod 65 °C, snadné řízení procesu a teplotní odolnost DPS pro vícenásobný teplotní cyklus. [7], [12]

- **environmentální kompatibilita**

Kompatibilita s environmentálními vlivy jako jsou například migrace stříbra nebo růst intermetalických vrstev. Dále pak ekologické zpracování odpadních vod a netoxická povrchová úprava. [7], [12]

### 1.6.1 Technologie HAL (Hot Air Levelling)

Při této povrchové úpravě se na povrch měděné vrstvy nanáší žárově vrstva pájky. V současné době se především používá bezolovnatá slitina cínu splňující požadavky směrnice RoHS. Deska je vertikálně ponořena do roztavené pájecí lázně a následně po jejím vynoření je ofukována horkým vzduchem (tzv. horkovzdušným nožem), který odstraní z desky přebytečnou pájku. Tloušťka povrchové úpravy se pohybuje v rozmezí od 2  $\mu\text{m}$  do 30  $\mu\text{m}$ . Proces výroby HAL si můžeme prohlédnout na obrázku 4. [9], [12], [13]



Obrázek 4: Proces výroby HAL [12]

Z obrázku 4 vidíme, že deska při této metodě povrchové úpravy je vystavena velkému teplotnímu šoku, který může způsobit deformaci desky. Z tohoto důvodu se definuje povolené prohnutí a zkroucení DPS po výrobě a povrchové úpravě. Prohnutí a zkroucení DPS by tedy před vlastním pájením nemělo být větší než: [7]

1 % u DPS tloušťky 0,8 – 1,5 mm

0,5 % u DPS tloušťky 1,5 – 3,2 mm

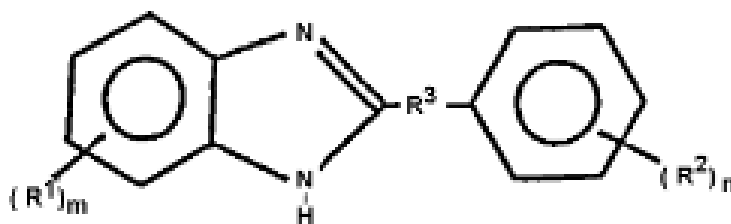
Další nevýhodou HALu je například větší intermetalická vrstva, horší spolehlivost procesu, která je spojena s deformací DPS nebo nedostatečná rovinnost pájecích ploch, které jsou kryty pájkou. Tento nedostatek HALu si můžeme prohlédnout na obrázku 5. [7]



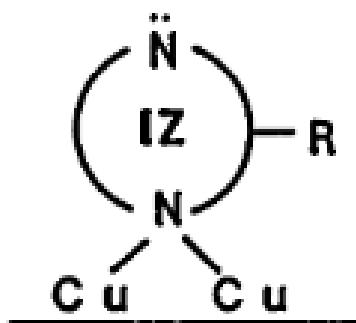
Obrázek 5: Typický vzhled pokoveného otvoru s HALem [7]

## 1.6.2 Technologie OSP (Organic Surface Protectives)

Při této metodě dochází k chemickému nanášení organických inhibitorů, jejichž funkcí je zabránění koroze mědi. Tyto inhibitory se nanáší na odhalený povrch mědi a zpravidla až po natisknutí nepájivé masky. Ve většině případů se jako inhibitory používají látky na bázi benzoimidazolů (viz obrázek 6). Slabé Van der Waalsovy síly drží vrstvy na povrchu. Tuto fixaci si můžeme prohlédnout na obrázku 7. Tato technologie se používá především u jednovrstvých DPS. [7], [10]

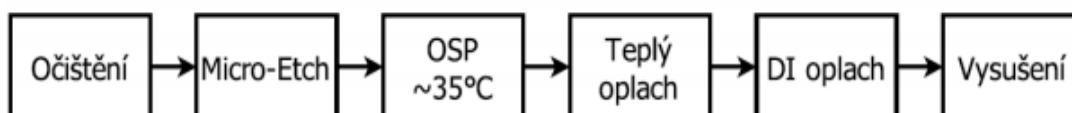


Obrázek 6: Struktura OSP [7]



Obrázek 7: Fixace OSP na měděný povrch [7]

Celý proces OSP můžeme vidět na obrázku 8.

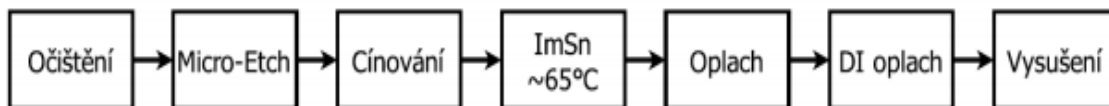


Obrázek 8: Postup výroby OSP [12]

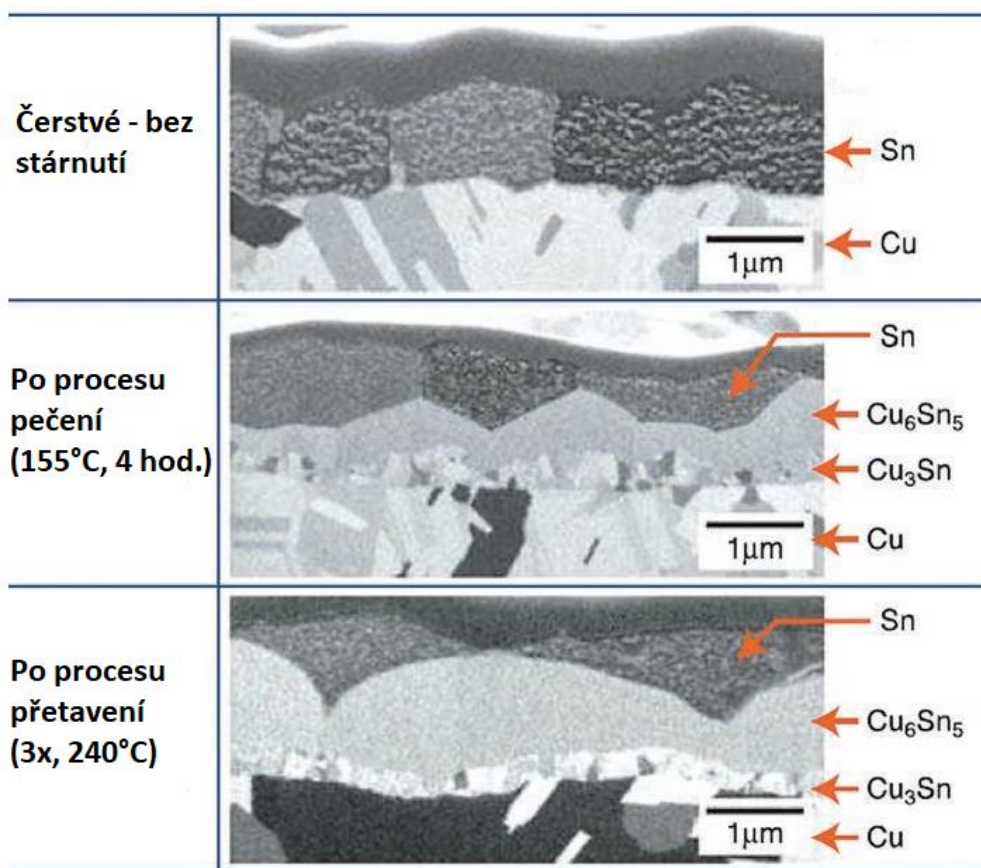
Výhody technologie povrchové úpravy OSP jsou dokonale rovinný povrch a nižší finanční náklady ve srovnání s HALem. Velkou nevýhodou této metody je krátká doba skladovatelnosti a maximálně dvojnásobný teplotní cyklus. [7], [10], [13]

### 1.6.3 ImSn (Imersní cín)

Při této metodě povrchové úpravy je na základní vrstvu mědi chemicky nanášen cín, který dále chrání vrstvu mědi před oxidací. Na základní měď je nanášena vrstva cínu o minimální tloušťce 1  $\mu\text{m}$ , kvůli vytvoření vhodných podmínek pro pájení. Hlavní výhodou této metody je výsledná velká kvalita rovinnosti povrchu, tudíž jsou vytvořeny vhodné podmínky pro SMT montáž. Velkou nevýhodou této metody je vznik intermetalických vrstev. Po pokovení mědi cínem nastává proces vzniku intermetalické vrstvy ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$  a  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ), při kterém začne měď prorůstat do cínové vrstvy. Rychlost růstu intermetalické vrstvy může výrazně ovlivnit okolní teplota a vlhkost (viz obrázek 10). Celý výrobní proces technologie povrchové úpravy imerzním cínem je zobrazen na obrázku 9. [10], [12]



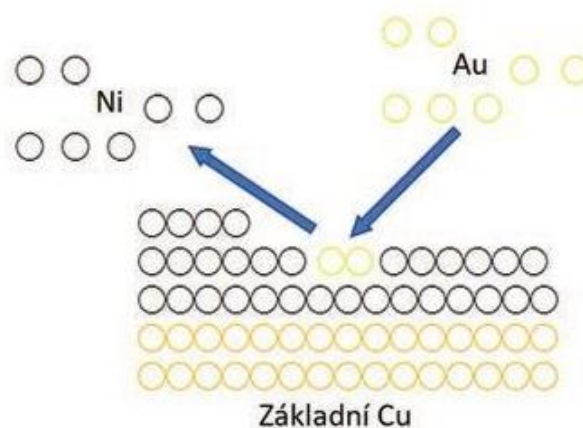
Obrázek 9: Postup výroby ImSn [12]



Obrázek 10: Vliv teploty na růst intermetalické vrstvy [10]

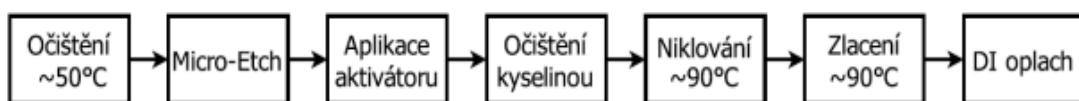
### 1.6.4 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)

V první fázi procesu dochází k čištění a leptání povrchu. Následuje příprava pro nanášení niklu na povrch mědi pomocí katalyzační lázně, jejíž funkcí je snížení aktivační energie mědi pro nanášení niklu. Na ten se v další fázi chemicky nanese vrstva zlata o minimální tloušťce 0,05  $\mu\text{m}$ . Tloušťka mezivrstvy niklu se pohybuje v rozmezí od 3 do 6  $\mu\text{m}$ . Imersní pokovení mědi zlatem si můžeme prohlédnout na obrázku 11. [10], [12]



Obrázek 11: Imerzní pokovení mědi zlatem [10]

Vrstva zlata je zde z toho důvodu, aby chránila vrstvu niklu před oxidací a zabránila jevu zvaný „Black Pad“. Nikl totiž při oxidaci zčerná (proto „Black Pad“). Celý výrobní proces technologie povrchové úpravy ENIG je zobrazen na obrázku 12. [10]



Obrázek 12: Postup výroby ENIG [12]

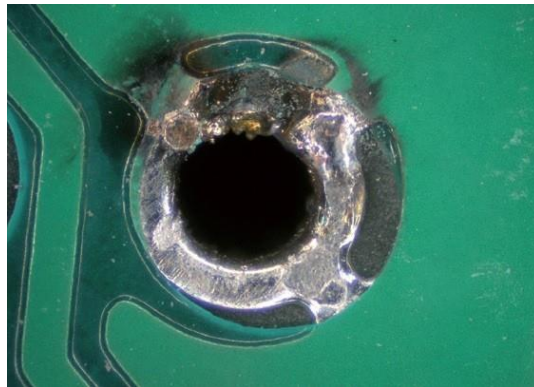
Mezi výhody ENIGu patří například vysoká odolnost vůči oxidaci nebo výborná rovinnost povrchu pro SMT montáž. Naopak nevýhodami jsou vyšší finanční náklady a hrozba oxidace mezivrstvy, která je tvořena niklem. [10]

## 1.7 Vady DPS

Typů vad, které se mohou objevit na deskách plošných spojů je mnoho. Nejčastěji k nim dochází již při samotné výrobě, ale není to jediný způsob. K poškození může dojít například při transportu desky z jednoho místa na druhé. Desky plošných spojů se v dnešní době vyrábějí hlavně v Asii, a pokud k osazení desky dochází například v Evropě, tak deska cestuje dlouhou trasu, během které s ní musí být vhodně zacházeno. V drtivé většině jsou však vady desek skutečně způsobené technologickou nekázní při samotné výrobě. V některých případech jsou vady vytvořeny i nevhodnou volbou základních materiálů pro výrobu. [14]

### 1.7.1 Vady způsobené chybnou opravou zkratů

Při výrobě DPS se někdy stane, že mezi vodivými cestami se objeví přebytečné množství mědi. Tato přebytečná měď může vytvořit vodivé spojení dvou sousedních vodivých cest, a tak vznikne v desce nežádoucí zkrat. Tyto tzv. nitkové zkratky se opravují odpálením za pomoci průchodu vysokého proudu. Takto vysoký proud může způsobit poškození vodičů a nepájivé masky, samotných otvorů nebo dokonce i samotných pájecích plošek. Na obrázku 13 si můžeme pozorně prohlédnout detail poškození otvoru. [15]



*Obrázek 13: Poškození otvoru [15]*

### 1.7.2 Přítomnost nečistot v desce

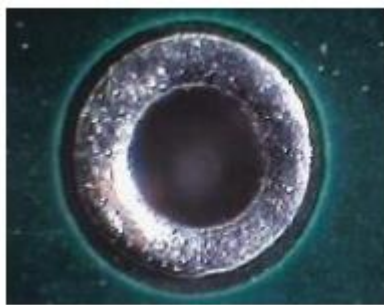
Nečistoty v desce se mohou vyskytovat na různých místech. Například na čistém laminátu nebo i pod nepájivou maskou. Tyto nečistoty disponují různými vlastnostmi, které nesmí v žádném případě způsobit výrazné změny vlastností a funkcí desky. Na základě parametrů vlastností nečistoty se dále rozhoduje, jestli je tato nečistota přijatelná a deska v praxi použitelná nebo ne. Přijatelná nečistota může být například ta, která svými vlastnostmi neovlivňuje vzdálenost mezi vodiči. Takovou nečistotu si můžeme prohlédnout na obrázku 14. Nepřijatelná nečistota je ta, která překrývá nebo se dotýká vodivé cesty. Nečistoty se do desky dostávají nejčastěji špatným provedením omytí při samotné výrobě desky nebo jeho úplným vynecháním. [2]



*Obrázek 14: Příklad přijatelné nečistoty [2]*

### 1.7.3 Souosost děr

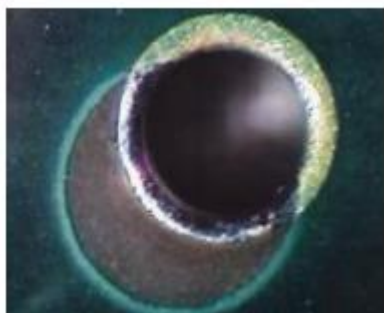
Tuto vadu rozdělujeme zpravidla na tři případy. Za prvé je to požadovaná souosost otvorů, kdy by se měly otvory v nepájivé masce přesně shodovat s otvory vytvořenými v laminátu. Druhý případ se týká desek, u kterých je souosost děr přijatelná. To znamená, že pájecí plochy otvorů jsou nepájivou maskou překryty minimálně a současně nesmějí být odhaleny sousední vodivé části. Poslední (třetí) případ je nepřijatelná souosost otvorů. V tomto případě již nepájivá maska zasahuje příliš do pájecích ploch otvorů a následně tato nesouměrnost způsobuje špatné pájení kontaktu v tomto místě. [2]



*Obrázek 15: Požadovaná souosost otvorů [2]*



*Obrázek 16: Přijatelná souosost otvorů [2]*

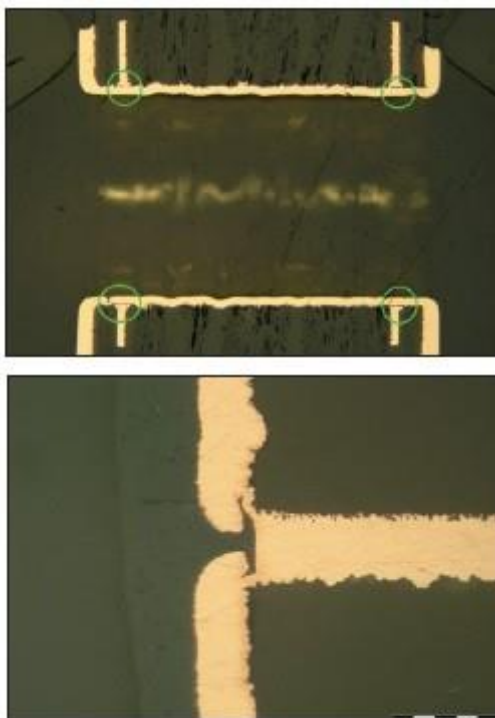


*Obrázek 17: Nepřijatelná souosost otvorů [2]*



#### 1.7.4 Špatné pokovení otvorů

Na tyto vady desek plošných spojů se ve většině případů přijde při vstupní kontrole a do samotného výrobku se DPS s touto vadou už nedostane. Tato vada má počátek již při samotném vrtání otvoru, kdy výrobci záměrně překračují dobu životnosti vrtáku, z důvodu ušetření peněz. Opotřebené vrtáky již nemají tak ostré hroty a místo toho, aby otvor vrtaly, ho spíše protlačují. Z tohoto důvodu dochází uvnitř otvoru ke zvýšení drsnosti povrchu a k výskytu vláken skelné tkaniny. Důsledkem těchto chyb dochází k nerovnoměrnému pokrytí otvoru mědí při pokovování. V zúžených místech pokovení může dojít k praskání mědi (Barrel Crack) a k přerušení vodivé cesty. Další chybou je špatné propojení vodivé cesty mezi otvorem a vnitřní vrstvou vlivem chybné technologie. Následkem mohou být opět praskliny a přerušení vodivých cest. Další praskliny mohou vznikat opět v napojení pokovení v otvoru a vnitřních vrstev vlivem špatné volby základního materiálu, který má vysokou roztažnost v zetové ose. [14], [16]



Obrázek 18: Nedostatečné napojení mědi v otvoru na vnitřní vrstvy [16]

### 1.7.5 Delaminace

Delaminace se nazývá stav, při kterém dochází k oddělení vnitřních vrstev materiálu. Faktorů, které způsobují delaminaci, je několik a mohou být buď mechanické (lisovací cyklus, typ prepregu, složení vrstev atd.), nebo chemické (oxidace, kontaminace atd.) povahy. Při tepelném zpracování desek může vlivem delaminace mezi základním materiálem a prepregem dojít k separaci vrstev. Tato separace může mít potom za následek roztrhání prokrovů. Oblast delaminace se na desce může projevit změnou barvy (viz obrázek 19). [14], [16], [17]



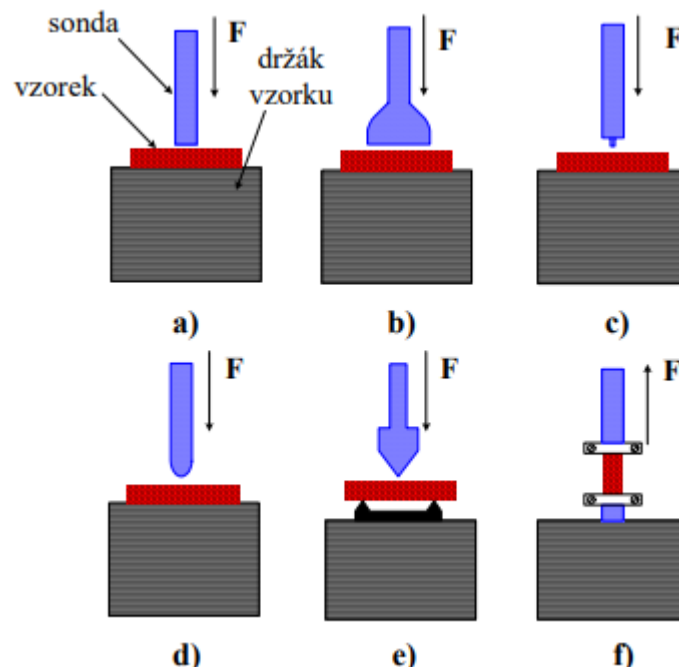
*Obrázek 19: Změna barvy desky v oblasti delaminace [17]*

## 2) Experimentální část

V experimentální části této bakalářské práce bylo mým úkolem odměřit pomocí termomechanické analýzy 2 sady vzorků desek plošných spojů s prokovením nebo bez a naměřená data vyhodnotit z pohledu změny rozměru v ose z, teploty skelného přechodu  $T_g$  a koeficientu teplotní roztažnosti  $\alpha$ .

### 2.1 Termomechanická analýza

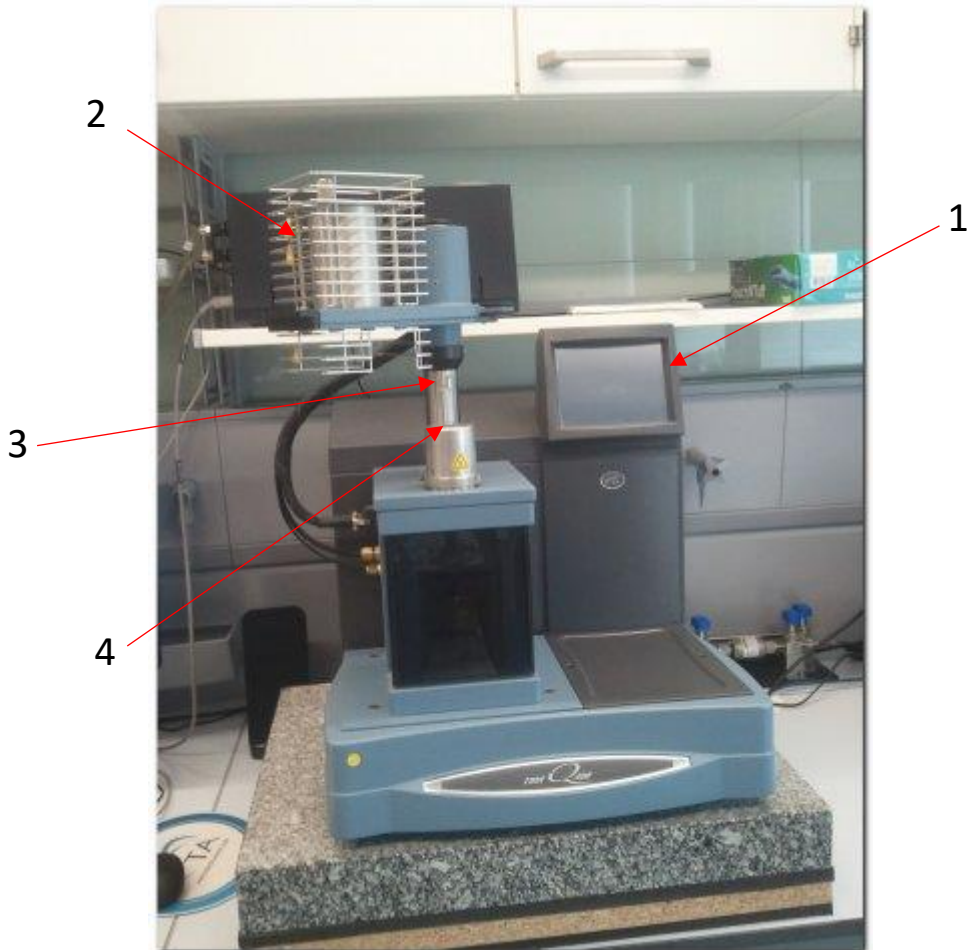
Termomechanická analýza (dále jen TMA) měří roztažnost materiálu při teplotní změně. Lze říci, že je to analýza, při které se měří deformace vzorku zatíženého předem definovanou konstantní silou jako funkce teploty, kterou si můžeme před samotným měřením nastavit. U TMA rozlišujeme několik módů měření, které závisí na druhu použité měřicí sondy. Tyto sondy můžeme podle jejich tvaru a použití rozdělit na sondy expanzní, penetrační, tahové, hemisférické atd. Přehled základních typů sond využívaných při termomechanické analýze si můžeme prohlédnout na obrázku 20. Před každým měřením je třeba si určit, jaké jsou naše požadované výstupní parametry, neboť použitím různých sond lze dosáhnout různých výsledků. [18]



Obrázek 20: Typy sond používaných při TMA [18]

a) expanzní, b) makroexpanzní, c) penetrační,  
d) hemisférická, e) pro třibodový ohyb, f) tahová

Přístroj, který provádí termomechanickou analýzu, se nazývá termomechanický analyzátor. V laboratoři naší fakulty se nachází termomechanický analyzátor typu Q400, který si můžeme prohlédnout na obrázku 21.

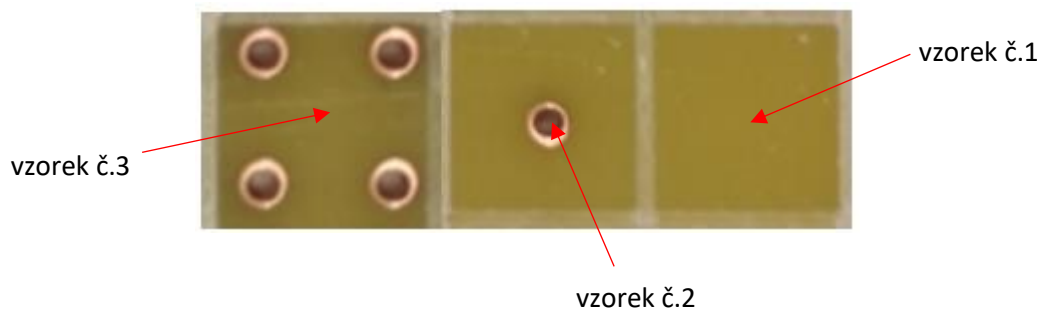


Obrázek 21: Termomechanický analyzátor Q400 [19]

- 1 dotykový display pro obsluhu přístroje
- 2 pec pro ohřátí měřeného vzorku
- 3 měřicí sonda
- 4 místo pro uložení měřeného vzorku

## 2.2 Vzorky

K dispozici jsem měl 2 sady vzorků. Každá sada obsahovala 3 vzorky (a to vždy jeden bez prokovu, jeden s jedním prokovem a jeden se čtyřmi prokovy). Tyto jednotlivé typy vzorků, které tvoří jednu sadu, si můžeme prohlédnout na obrázku 22. Všechny vzorky byly ze stejného základního materiálu (skloepoxidový substrát). Pokud zaměříme naši pozornost na pokovené otvory, tak uvidíme měď. To znamená, že deska neprošla žádnou povrchovou úpravou.



Obrázek 22: Měřené vzorky

První sada vzorků byla změřena bez jakýchkoliv úprav. Druhá sada vzorků prošla před samotným měřením pájecí pecí Mistral 260, kterou si můžeme prohlédnout na obrázku 23 a kterou jsem měl k dispozici v laboratoři.



Obrázek 23: Pájecí pec Mistral 260

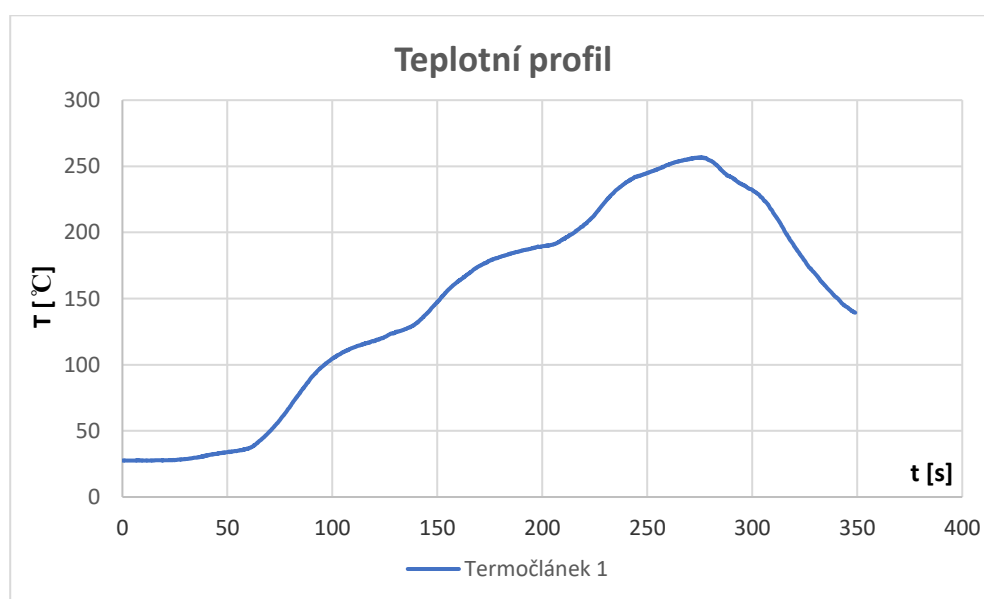
Pec se vyznačuje třemi topnými zónami, ve kterých lze nastavit požadovanou teplotu. První a druhá zóna slouží k předehřevu pasty a DPS. Třetí zóna s nejvyšší

teplotou slouží k přetavení pájecí pasty. Ohřev je zajištěn topnými spirálami. Ohřátý vzduch je nadále pomocí ventilátorů rozváděn v pásmech ohřevu. Rychlost dopravníku, pomocí kterého jsou vzorky přepravovány skrz pec, se pohybuje od 15 cm do 60 cm za minutu. Pec disponuje dotykovým displayem, přes který lze zadávat parametry procesu. [20]

*Tabulka 5: Nastavené parametry*

<b>Nastavené parametry:</b>	
<b>Předehřev 1 [°C]</b>	140
<b>Předehřev 2 [°C]</b>	200
<b>Přetavení [°C]</b>	260

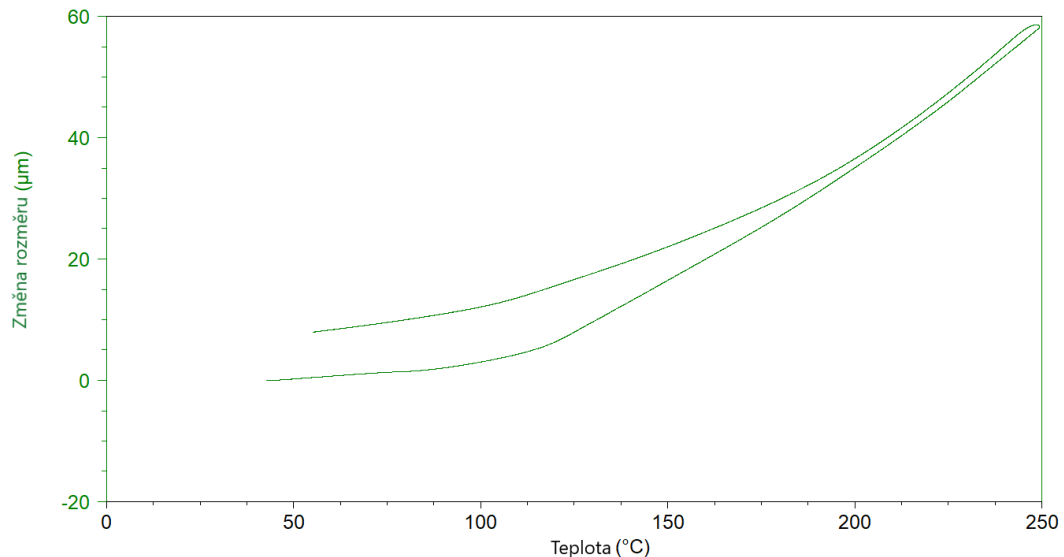
Před průchodem vzorků pecí byl změřen teplotní profil. Ten si můžeme prohlédnout na grafu 1.



*Graf 1: Průběh teplotního profilu*

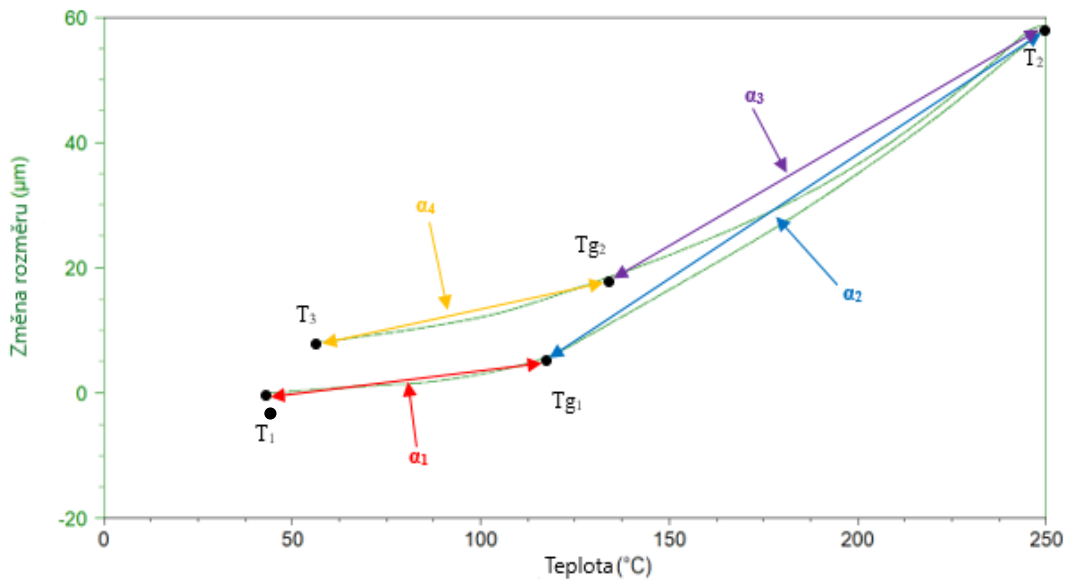
### 2.3 Naměřená a vypočítaná data

V mém případě jsem k měření používal expanzní sondu s přítlačnou silou o velikosti 0,01N. S ohledem na toto nastavení lze předpokládat, že výsledek bude křivka teplotní roztažnosti, což je závislost změny rozměru  $\Delta l$  v ose Z na změně teploty  $T$ . Na obrázku 24 si můžeme prohlédnout teoretickou závislost  $\Delta l = f(T)$ . [18]



Obrázek 24: Teoretický průběh  $\Delta l = f(T)$

Z grafu této závislosti lze vyčíst nebo spočítat všechny potřebné parametry. Tudiž se podíváme na teplotu skelného přechodu  $T_g$ , kterou si vzorek projde jak při zahřátí, tak při chlazení. Dále pak na celkovou změnu rozměru  $\Delta l$  v ose Z. Hodnoty těchto dvou parametrů lze zjistit odečtením z grafické závislosti. U zjišťování koeficientu teplotní roztažnosti  $\alpha$  už to tak snadné nebude a musíme si pomoci výpočtem. V našem případě získáme u vzorků čtyři koeficienty teplotní roztažnosti  $\alpha$ . Dva při zahřívání a dva při chlazení vzorku. Dělicí hranicí dvou koeficientů  $\alpha$ , ať už při zahřátí nebo chlazení vzorku, bude teplota skelného přechodu  $T_g$ . Pro lepší porozumění se můžeme podívat na obrázek 25.



Obrázek 25: Detail požadovaných parametrů

- T<sub>1</sub>** teplota vzorku na počátku měření [°C]
- T<sub>g1</sub>** teplota skelného přechodu při ohřívání vzorku [°C]
- T<sub>2</sub>** teplota vzorku na konci ohřívání vzorku [°C]
- T<sub>g2</sub>** teplota skelného přechodu při chlazení vzorku [°C]
- T<sub>3</sub>** teplota vzorku na konci chlazení vzorku [°C]
- α<sub>1</sub>** koeficient teplotní roztažnosti ve sklovitém stavu v rozmezí T<sub>1</sub> – T<sub>g1</sub>
- α<sub>2</sub>** koeficient teplotní roztažnosti ve stavu kaučukovitém v rozmezí T<sub>g1</sub> – T<sub>2</sub>
- α<sub>3</sub>** koeficient teplotní roztažnosti ve stavu kaučukovitém v rozmezí T<sub>2</sub> – T<sub>g2</sub>
- α<sub>4</sub>** koeficient teplotní roztažnosti ve sklovitém stavu v rozmezí T<sub>g2</sub> – T<sub>3</sub>

Koeficient teplotní roztažnosti spočítáme ze vzorce:



$$\alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T}, \quad (6)$$

kde  $\alpha$  je koeficient teplotní roztažnosti [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]

$l_0$  je původní rozměr vzorku před měřením [m]

$l_1$  je rozměr vzorku při dosažení teploty  $T_{g1}$  [ $\mu\text{m}$ ]

$l_2$  je rozměr vzorku na konci fáze ohřívání vzorku [ $\mu\text{m}$ ]

$l_3$  je rozměr vzorku při dosažení teploty  $T_{g2}$  [ $\mu\text{m}$ ]

$l_4$  je rozměr vzorku na konci měření [ $\mu\text{m}$ ]

$\Delta l/\Delta T$  je sklon termomechanické křivky [ $\mu\text{m} \cdot \text{C}^{-1}$ ]

Za účelem lepší orientace mezi sady vzorků a jednotlivými vzorky jsem zvolil následující označení každého vzorku: **x.y**, kde **x** označuje číslo vzorku podle obrázku 22, a **y** označuje sadu vzorků. Jak jednotlivé označení vzorků číst je jasné z příkladu níže.

Příklad: 1.1 je vzorek č.1 bez prokovů z první sady.

3.2 je vzorek č.3 se čtyřmi prokvy z druhé sady, která prošla pecí.

## 2.3.1 První sada vzorků

### 2.3.1.1 Vzorek 1.1

Tento vzorek je mezi ostatními jedinečný v tom, že neobsahuje žádné pokovené otvory. Výsledný graf termomechanické analýzy tohoto vzorku nalezneme v příloze 1.

Tabulka 6: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro vzorek 1.1

Vzorek 1.1			
$l_0$ [m]	0,0015529	$\alpha$ vypočítaná v programu	
$l_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	13,37	$\alpha_1$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]	71,09
$l_2$ [ $\mu\text{m}$ ]	63,05	$\alpha_2$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]	298,5
$l_3$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,573	$\alpha_3$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]	321,3
$l_4$ [ $\mu\text{m}$ ]	-8,988	$\alpha_4$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]	112,6
$T_1$ [°C]	20,63	$\alpha$ vypočítaná	
$T_2$ [°C]	249,4	$\alpha_1$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]	70,96
$T_3$ [°C]	50,56	$\alpha_2$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]	297,76
$T_{g1}$ [°C]	141,96	$\alpha_3$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]	320,51
$T_{g2}$ [°C]	133,92	$\alpha_4$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]	112,48
celková změna rozměru v ose Z [ $\mu\text{m}$ ]			8,988

Příklad výpočtu pro  $\alpha_4$ :

$$\alpha_4 = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_3 - l_4}{T_{g2} - T_3} = \frac{1}{0,0015529} \cdot \frac{5,573 + 8,988}{133,92 - 50,56} = 112,48 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

### 2.3.1.2 Vzorek 2.1

U tohoto vzorku jsem se snažil sjet s měřicí sondou přesně na pokovený otvor. Výsledný graf termomechanické analýzy tohoto vzorku nalezneme v příloze 2.

Tabulka 7: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro vzorek 2.1

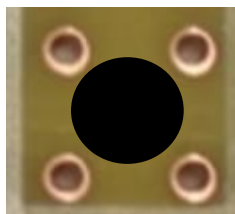
Vzorek 2.1			
<b>l<sub>0</sub> [m]</b>	0,0015948	<b>α vypočítaná v programu</b>	
<b>l<sub>1</sub> [μm]</b>	9,556	<b>α<sub>1</sub> [μm·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>]</b>	68,88
<b>l<sub>2</sub> [μm]</b>	58,28	<b>α<sub>2</sub> [μm·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>]</b>	256
<b>l<sub>3</sub> [μm]</b>	23,79	<b>α<sub>3</sub> [μm·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>]</b>	235,7
<b>l<sub>4</sub> [μm]</b>	7,985	<b>α<sub>4</sub> [μm·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>]</b>	97,26
<b>T<sub>1</sub> [°C]</b>	42,82	<b>α vypočítaná</b>	
<b>T<sub>2</sub> [°C]</b>	249,4	<b>α<sub>1</sub> [μm·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>]</b>	68,91
<b>T<sub>3</sub> [°C]</b>	55,2	<b>α<sub>2</sub> [μm·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>]</b>	255,39
<b>Tg<sub>1</sub> [°C]</b>	129,77	<b>α<sub>3</sub> [μm·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>]</b>	234,84
<b>Tg<sub>2</sub> [°C]</b>	157,31	<b>α<sub>4</sub> [μm·m<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>]</b>	97,06
<b>celková změna rozměru v ose Z [μm]</b>			7,985

Příklad výpočtu pro α<sub>4</sub>:

$$\alpha_4 = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_3 - l_4}{T_{g2} - T_3} = \frac{1}{0,0015948} \cdot \frac{23,79 - 7,985}{157,31 - 55,2} = \mathbf{97,06 \mu m / (m \cdot ^\circ C)}$$

### 2.3.1.3 Vzorek 3.1

U tohoto vzorku jsem se snažil trefit s měřicí sondou mezi 4 pokovené otvory, což si můžeme prohlédnout na obrázku 26. Výsledný graf termomechanické analýzy tohoto vzorku nalezneme v příloze 3.



Obrázek 26: Náčrtek vzájemné polohy měřící sondy a proků

Tabulka 8: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro vzorek 3.1

Vzorek 3.1			
$l_0$ [m]	0,0015794	$\alpha$ vypočítaná v programu	
$l_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	7,962	$\alpha_1$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	39,86
$l_2$ [ $\mu\text{m}$ ]	47,07	$\alpha_2$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	261,9
$l_3$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,4688	$\alpha_3$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	240
$l_4$ [ $\mu\text{m}$ ]	-7,352	$\alpha_4$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	70,19
$T_1$ [°C]	27,99	$\alpha$ vypočítaná	
$T_2$ [°C]	249,43	$\alpha_1$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	39,71
$T_3$ [°C]	55,62	$\alpha_2$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	262,05
$T_{g1}$ [°C]	154,94	$\alpha_3$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	239,61
$T_{g2}$ [°C]	126,29	$\alpha_4$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	70,07
celková změna rozměru v ose Z [ $\mu\text{m}$ ]			7,352

Příklad výpočtu pro  $\alpha_4$ :

$$\alpha_4 = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_3 - l_4}{T_{g2} - T_3} = \frac{1}{0,0015794} \cdot \frac{0,4688 + 7,352}{126,29 - 55,62} = 70,07 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{C})$$

## 2.3.2 Druhá sada vzorků (vzorky, které prošly před měřením pecí)

### 2.3.2.1 Vzorek 1.2

Výsledný graf termomechanické analýzy tohoto vzorku nalezneme v příloze 4.

Tabulka 9: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro vzorek 1.2

Vzorek 1.2			
$l_0$ [m]	0,001628	<b><math>\alpha</math> vypočítaná v programu</b>	
$l_1$ [μm]	13,05	$\alpha_1$ [μm·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ]	78,40
$l_2$ [μm]	61,27	$\alpha_2$ [μm·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ]	236,60
$l_3$ [μm]	1,29	$\alpha_3$ [μm·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ]	314,00
$l_4$ [μm]	-12,54	$\alpha_4$ [μm·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ]	109,30
$T_1$ [°C]	22,39	<b><math>\alpha</math> vypočítaná</b>	
$T_2$ [°C]	249,36	$\alpha_1$ [μm·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ]	78,54
$T_3$ [°C]	54,56	$\alpha_2$ [μm·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ]	237,12
$T_{g1}$ [°C]	124,45	$\alpha_3$ [μm·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ]	314,47
$T_{g2}$ [°C]	132,20	$\alpha_4$ [μm·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ]	109,42
celková změna rozměru v ose Z [μm]			12,54

Příklad výpočtu pro  $\alpha_4$ :

$$\alpha_4 = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_3 - l_4}{T_{g2} - T_3} = \frac{1}{0,001628} \cdot \frac{1,29 + 12,54}{132,20 - 54,56} = 109,42 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

### 2.3.2.2 Vzorek 2.2

Výsledný graf termomechanické analýzy tohoto vzorku nalezneme v příloze 5.

Tabulka 10: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro vzorek 2.2

Vzorek 2.2			
$l_0$ [m]	0,0016151	$\alpha$ vypočítaná v programu	
$l_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	11,84	$\alpha_1$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	63,06
$l_2$ [ $\mu\text{m}$ ]	52,19	$\alpha_2$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	236,80
$l_3$ [ $\mu\text{m}$ ]	13,81	$\alpha_3$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	258,50
$l_4$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,1985	$\alpha_4$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	82,31
$T_1$ [°C]	28,24	$\alpha$ vypočítaná	
$T_2$ [°C]	249,43	$\alpha_1$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	63,45
$T_3$ [°C]	54,78	$\alpha_2$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	234,57
$T_{g1}$ [°C]	143,77	$\alpha_3$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	256,36
$T_{g2}$ [°C]	157,47	$\alpha_4$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	81,42
celková změna rozměru v ose Z [ $\mu\text{m}$ ]			0,1985

Příklad výpočtu pro  $\alpha_4$ :

$$\alpha_4 = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_3 - l_4}{T_{g2} - T_3} = \frac{1}{0,0016151} \cdot \frac{13,81 - 0,1985}{157,47 - 54,78} = 81,42 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{C}^\circ)$$

### 2.3.2.3 Vzorek 3.2

Výsledný graf termomechanické analýzy tohoto vzorku nalezneme v příloze 6.

Tabulka 11: Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro vzorek 3.2

Vzorek 3.2			
$l_0$ [m]	0,0016143	$\alpha$ vypočítaná v programu	
$l_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	9,44	$\alpha_1$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	54,41
$l_2$ [ $\mu\text{m}$ ]	47,02	$\alpha_2$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	195,30
$l_3$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,01	$\alpha_3$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	245,70
$l_4$ [ $\mu\text{m}$ ]	-9,29	$\alpha_4$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	92,06
$T_1$ [C]	22,40	$\alpha$ vypočítaná	
$T_2$ [C]	249,41	$\alpha_1$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	54,29
$T_3$ [C]	55,41	$\alpha_2$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	195,19
$T_{g1}$ [C]	130,16	$\alpha_3$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	245,68
$T_{g2}$ [C]	138,43	$\alpha_4$ [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ ]	91,77
celková změna rozměru v ose Z [ $\mu\text{m}$ ]			9,294

Příklad výpočtu pro  $\alpha_4$ :

$$\alpha_4 = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_3 - l_4}{T_{g2} - T_3} = \frac{1}{0,0016143} \cdot \frac{3,01 + 9,29}{138,43 - 55,41} = 91,77 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{C})$$

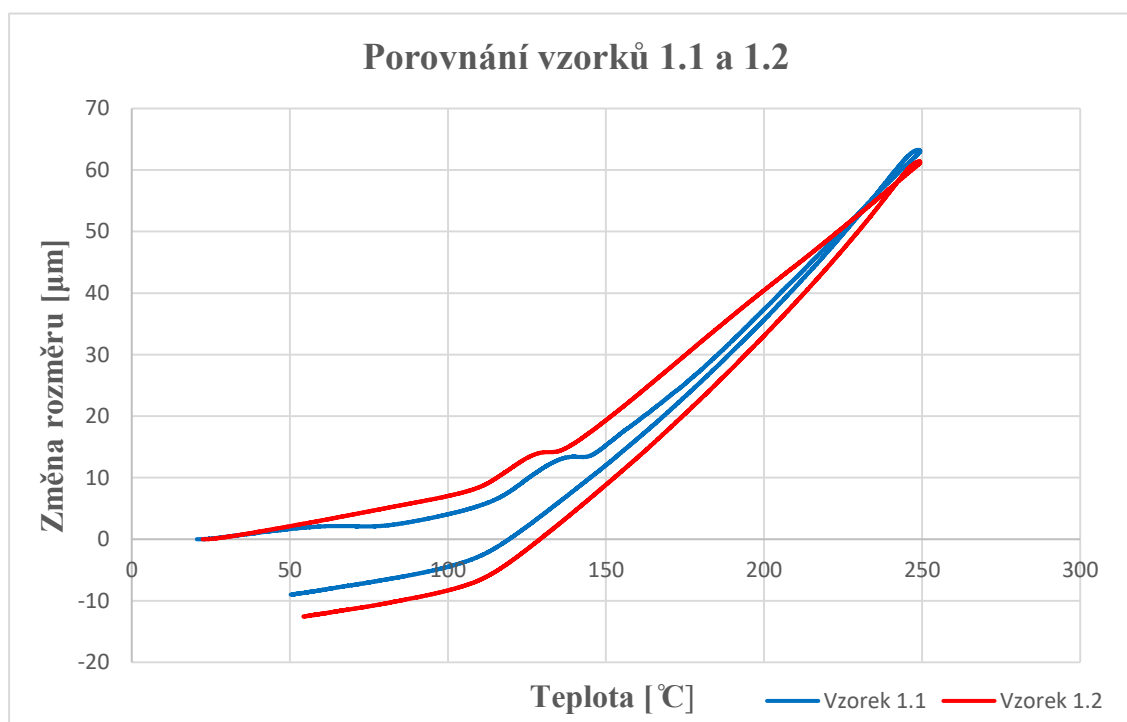
### 2.3.3 Porovnání první a druhé sady vzorků

V následující části se blíže podívám na porovnání první a druhé sady vzorků, které jsem naměřil. Vzorky obsažené v obou sadách jsou totožné, až na jednu výjimku. Vzorky ve druhé sadě prošly před samotným měřením pecí Mistrál 260, jak jsem již zmínil. Sobě si odpovídající vzorky budu porovnávat z hlediska celkové změny rozměru v ose Z, teplot skelného přechodu a koeficientů teplotní roztažnosti.

### 2.3.3.1 Porovnání vzorků 1.1 a 1.2

Tabulka 12: Porovnání vzorků 1.1 a 1.2

Vzorek 1.1		Vzorek 1.2	
$l_0$ [m]	0,0015529	$l_0$ [m]	0,001628
$T_{g1}$ [°C]	141,96	$T_{g1}$ [°C]	124,45
$T_{g2}$ [°C]	133,92	$T_{g2}$ [°C]	132,20
$\alpha_1$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	71,09	$\alpha_1$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	78,40
$\alpha_2$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	298,50	$\alpha_2$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	236,60
$\alpha_3$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	321,30	$\alpha_3$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	314,00
$\alpha_4$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	112,60	$\alpha_4$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	109,30
$\Delta l$ v ose Z [ $\mu\text{m}$ ]	8,988	$\Delta l$ v ose Z [ $\mu\text{m}$ ]	12,54



Graf 2: Porovnání vzorků 1.1 a 1.2

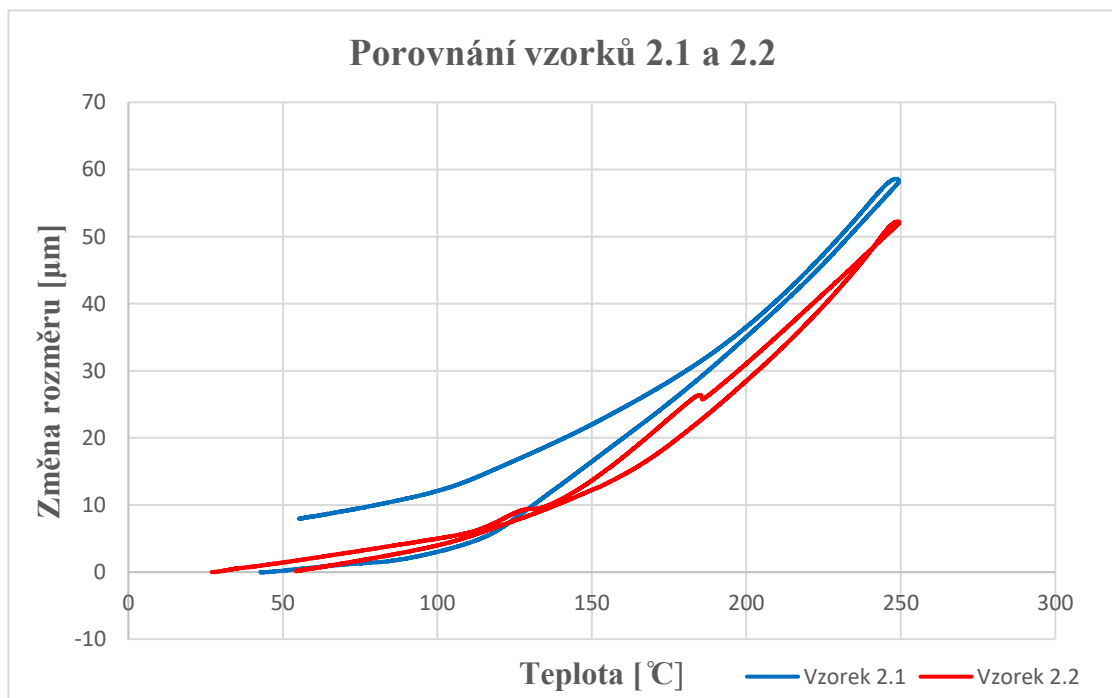
Z tabulky 14 je vidět, že vzorek 1.2, který před měřením prošel pecí, má větší počáteční rozměr  $l_0$ . Teplota  $T_{g2}$  se téměř nezměnila, zatímco teplota  $T_{g1}$  je u vzorku z druhé sady o zhruba 18 °C nižší. Koeficienty teplotní roztažnosti  $\alpha_1$ ,  $\alpha_3$ , a  $\alpha_4$  jsou podobné, ale koeficient  $\alpha_2$  je u vzorku 1.1 podstatně větší. Z toho můžeme usoudit, že vzorek 1.1 se při dosažení nastavené teploty 250 °C více roztáhne, což můžeme sledovat na grafu 2. Celková změna rozměru v ose Z byla větší u vzorku 1.2.



### 2.3.3.2 Porovnání vzorků 2.1 a 2.2

Tabulka 13: Porovnání vzorků 2.1 a 2.2

Vzorek 2.1		Vzorek 2.2	
$l_0$ [m]	0,0015948	$l_0$ [m]	0,0016151
$T_{g1}$ [°C]	129,77	$T_{g1}$ [°C]	143,77
$T_{g2}$ [°C]	157,31	$T_{g2}$ [°C]	157,47
$\alpha_1$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	68,88	$\alpha_1$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	63,06
$\alpha_2$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	256,00	$\alpha_2$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	236,80
$\alpha_3$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	235,70	$\alpha_3$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	258,50
$\alpha_4$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	97,26	$\alpha_4$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ]	82,31
$\Delta l$ v ose Z [ $\mu\text{m}$ ]	7,985	$\Delta l$ v ose Z [ $\mu\text{m}$ ]	0,1985



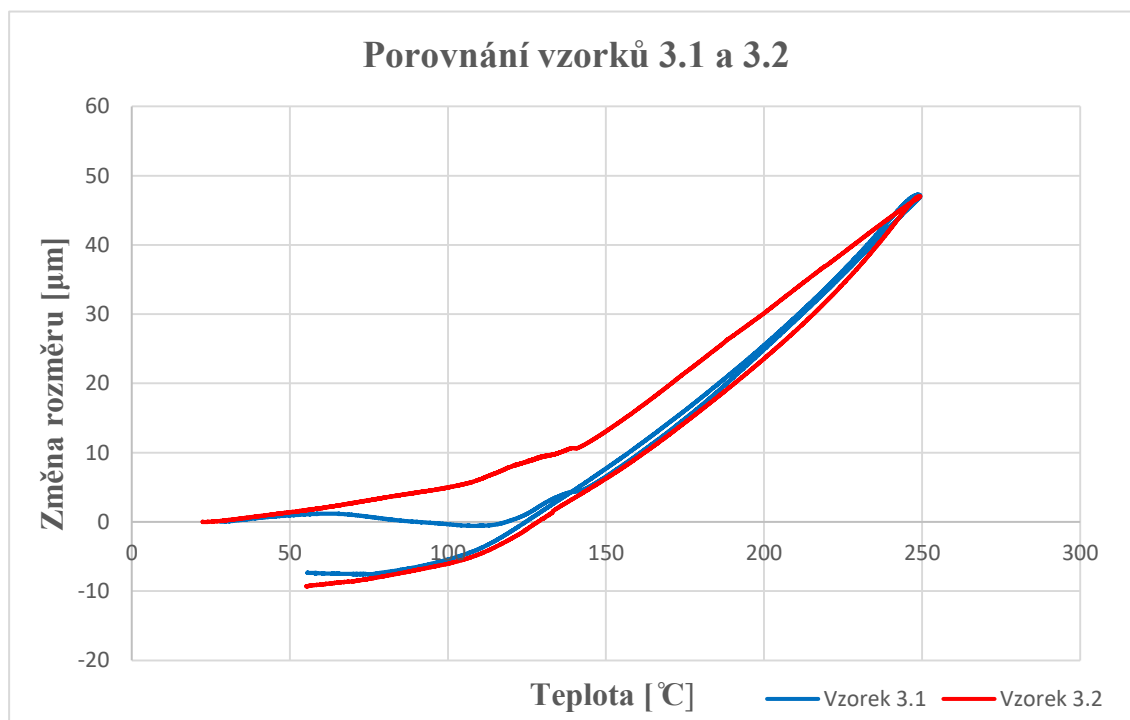
Graf 3: Porovnání vzorků 2.1 a 2.2

V tabulce 15 vidíme, že u vzorku z druhé sady byl naměřen větší počáteční rozměr  $l_0$ . Teplota  $T_{g2}$  se opět téměř nezměnila. Teplota  $T_{g1}$  je u vzorku 2.2 o 14 °C větší než u vzorku 2.1. Celková změna rozměru v ose Z byla větší u vzorku 2.1, o tom se můžeme přesvědčit z grafu 3.

### 2.3.3.3 Porovnání vzorků 3.1 a 3.2

Tabulka 14: Porovnání vzorků 4.1 a 4.2

Vzorek 3.1		Vzorek 3.2	
$l_0$ [m]	0,0015794	$l_0$ [m]	0,0016143
$T_{g1}$ [°C]	154,94	$T_{g1}$ [°C]	130,16
$T_{g2}$ [°C]	126,29	$T_{g2}$ [°C]	138,43
$\alpha_1$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ]	39,86	$\alpha_1$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ]	54,41
$\alpha_2$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ]	261,90	$\alpha_2$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ]	195,30
$\alpha_3$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ]	240,00	$\alpha_3$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ]	245,70
$\alpha_4$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ]	70,19	$\alpha_4$ [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ]	92,06
$\Delta l$ v ose Z [ $\mu\text{m}$ ]	7,352	$\Delta l$ v ose Z [ $\mu\text{m}$ ]	9,294



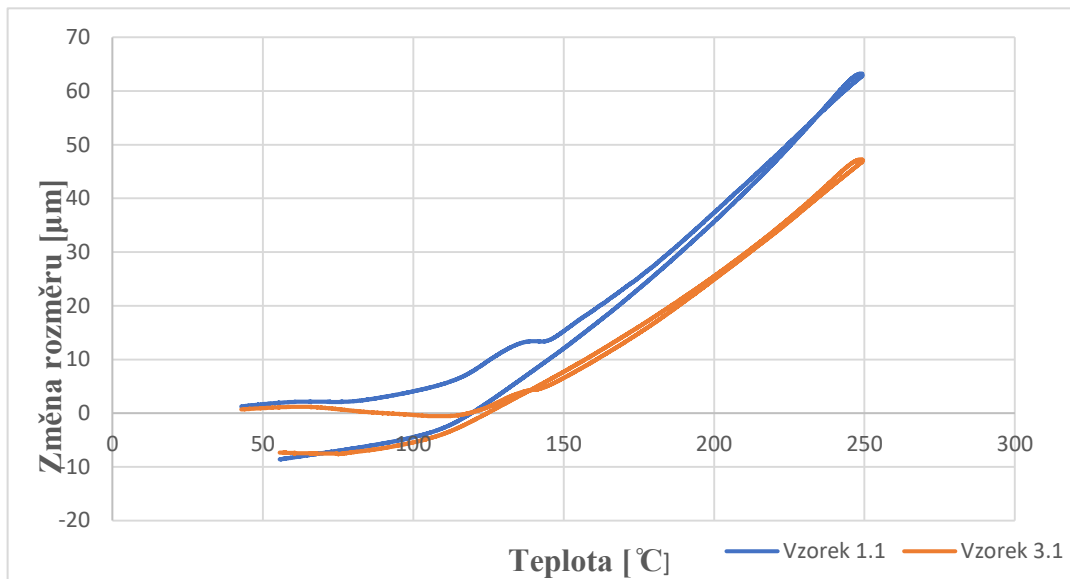
Graf 4: Porovnání vzorků 3.1 a 3.2

Z tabulky 16 vidíme, že u vzorku z druhé sady byl opět naměřen větší počáteční rozměr  $l_0$ . Teplota  $T_{g2}$  se u vzorku 3.2 zvýšila o 12 °C oproti vzorku 3.1. Teplota  $T_{g1}$  se naopak u vzorku z druhé sady snížila o téměř 25 °C oproti vzorku z první sady. Během měření se více roztáhl vzorek 3.2, který si prošel pecí.

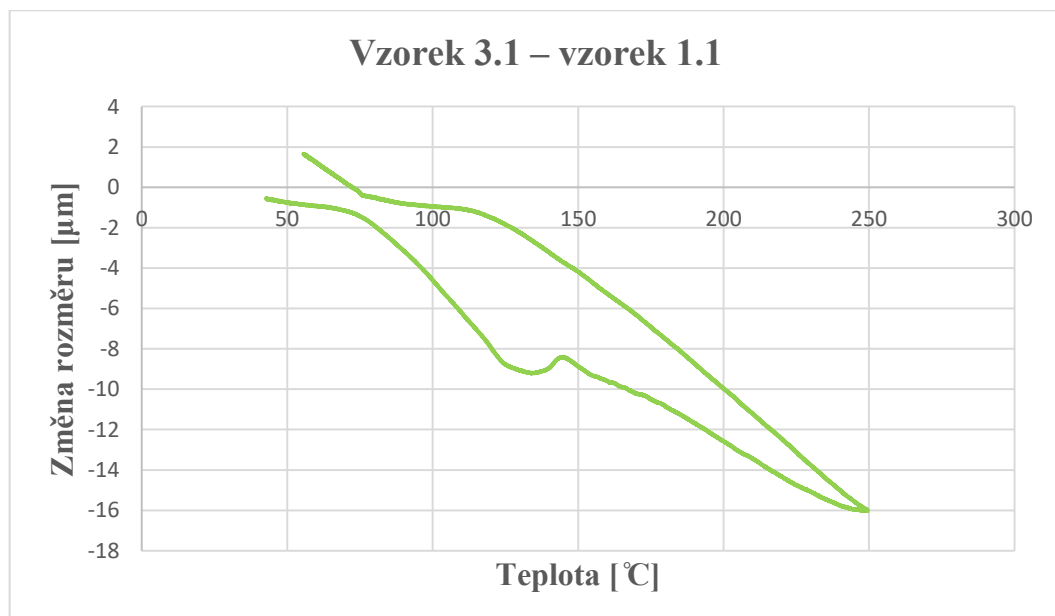
### 2.3.4 Vliv prokůvů na roztažnost DPS

Každý vzorek byl podroben termomechanické analýze, tudíž ke každému vzorku mám změřenou křivku roztažnosti (viz přílohy 1 - 6). Každá tato křivka je vzhledem k jedinečnosti vzorků odlišná. Jelikož jsou roztažnosti aditivní, tak je mohou od sebe odčítat (můj případ) anebo sčítat.

#### 2.3.4.1 Vzorek 3.1 – vzorek 1.1



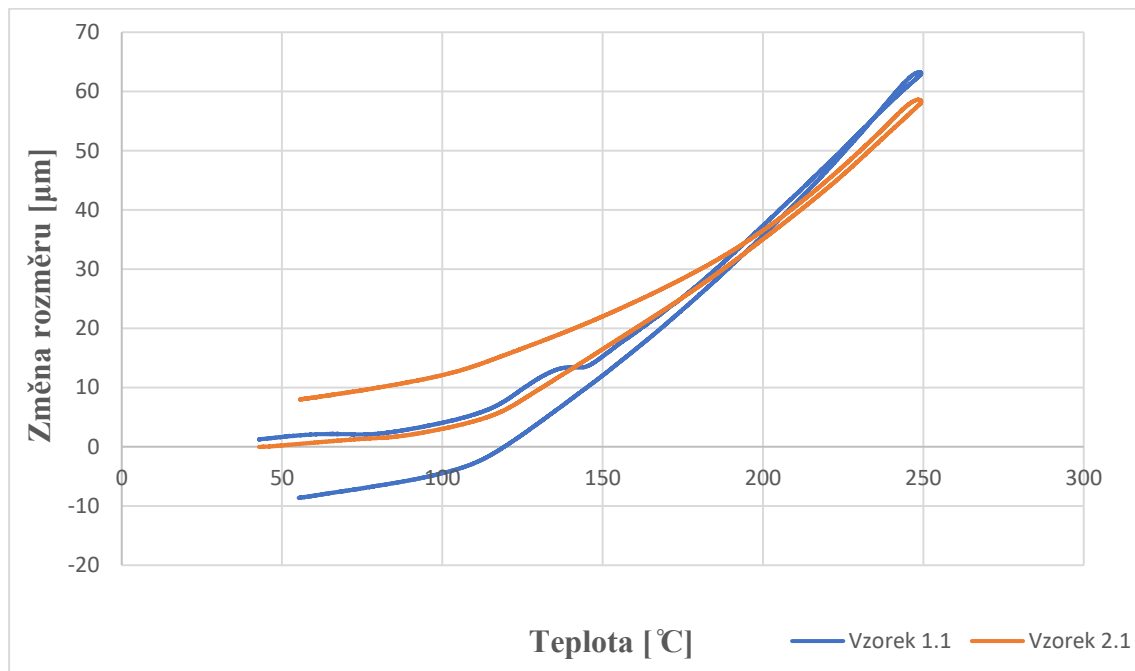
Graf 5: Závislost změny rozměru  $\Delta l$  na změně teploty  $T$  pro vzorky 3.1 a 1.1



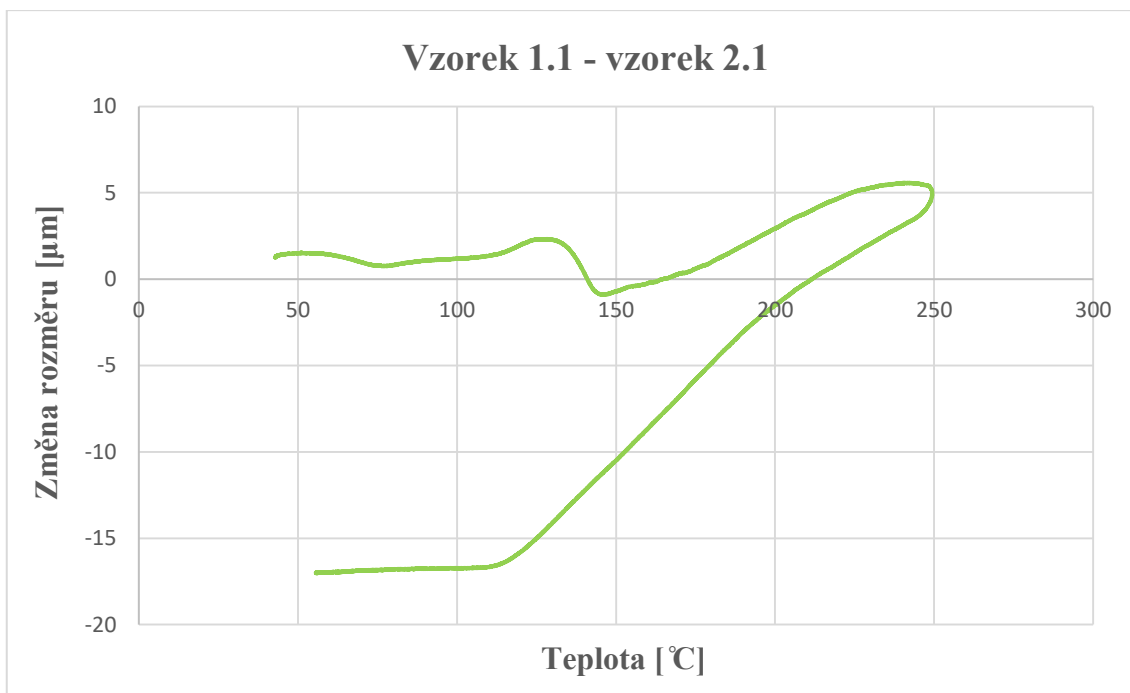
Graf 6: Výsledek rozdílu vzorek 3.1 – vzorek 1.1

Graf 5 znázorňuje průběhy obou vzorků. Z tohoto grafu je patrné, že vzorek 3.1, který obsahu čtyři pokovené otvory, má ve výsledku menší změnu rozměru oproti vzorku 1.1, který prokovy neobsahuje. Dále vidíme, že během fáze ohřívání vzorku se více roztáhl vzorek 1.1 neobsahující prokovy. Pokud zaměříme naši pozornost na graf 6, který znázorňuje výsledek rozdílu obou vzorků, tak bychom měli vidět vliv prokovů na roztažnost DPS. Z tohoto průběhu lze vypočítat, že do cca 75 °C jsou oba průběhy téměř totožné. Se vzrůstající teplotou se začíná projevovat vliv prokovů a vzorek 3.1 se roztahuje pomaleji než vzorek 1.1. Největšího rozdílu změn rozměrů obou vzorků je dosaženo při teplotě 250 °C. Během ochlazování vzorku vliv prokovů s teplotou klesá. Při dosažení teploty cca 120 °C jsou oba průběhy opět téměř totožné.

#### 2.3.4.2 Vzorek 1.1 – vzorek 2.1



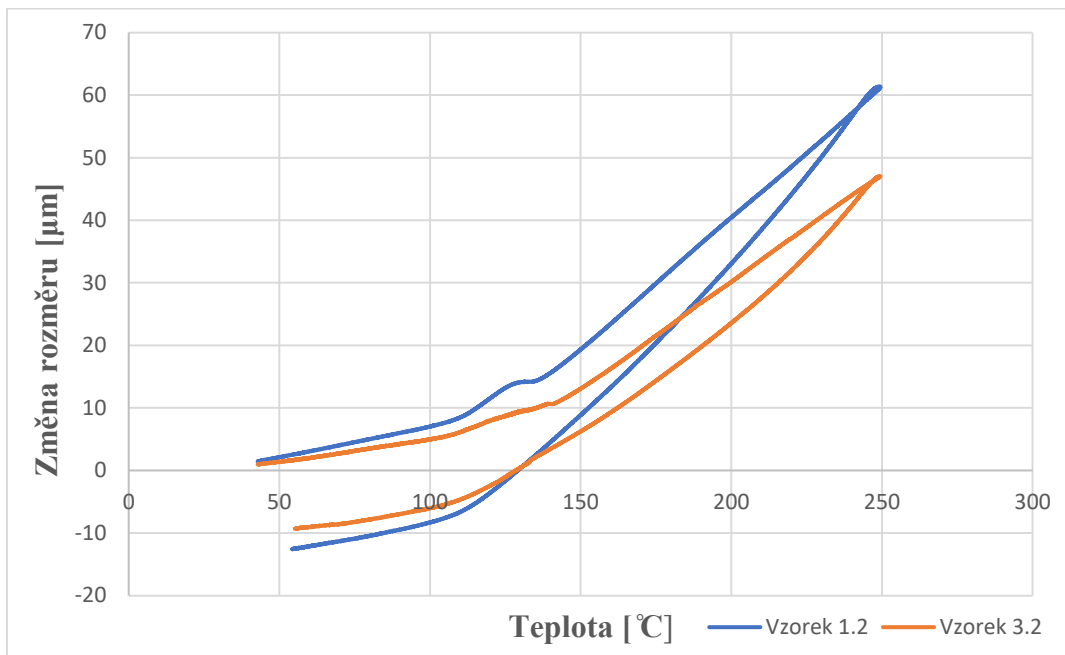
Graf 7: Závislost změny rozměru  $\Delta l$  na změně teploty  $T$  pro vzorky 1.1 a 2.1



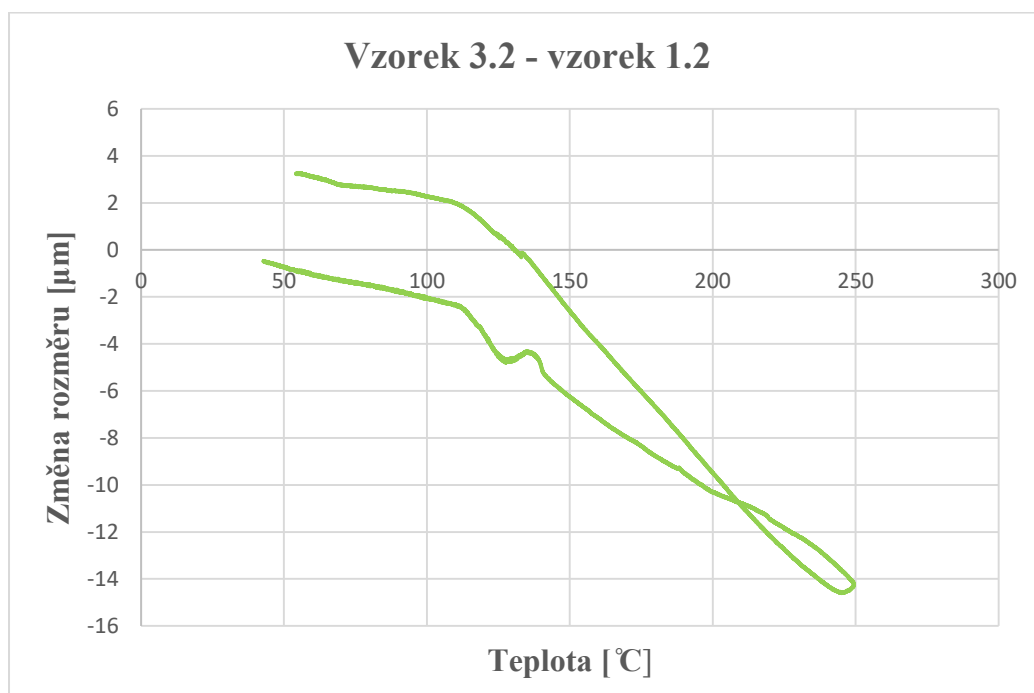
Graf 8: Výsledek rozdílu vzorek 1.1 – vzorek 2.1

V grafu 7 jsou vykresleny průběhy obou vzorků. Celková změna rozměru byla naměřena větší u vzorku 1.1, který neobsahuje prokovy. Z grafu můžeme také vyčíst, že vzorek 2.1, který obsahuje jeden pokovený otvor, je na konci fáze ohřívání vzorku při teplotě 250 °C méně roztažený než vzorek 1.1. To nám potvrzuje fakt, že měď, ze které jsou prokovy vyrobeny, je méně závislá na teplotě než substrát desky. Graf 8 zobrazuje výsledek rozdílu 1.1 - 2.1. Vidíme, že do 170 °C se průběhy takřka shodují. Při vyšší teplotě má větší roztažnost vzorek 1.1 než vzorek 2.1. Rozdíl změn rozměrů při dosažení konečné teploty fáze ohřívání je u tohoto odečtu menší než u odečtu vzorků 3.1 – 1.1. V průběhu chlazení vzorku rozdíl změn rozměrů s teplotou téměř lineárně klesá až do teploty 120 °C. Od této teploty až do konečné teploty je průběh na grafu 8 skoro konstantní. Z toho plyne, že vzorky 1.1 a 2.1 mají v tomto teplotním rozmezí stejný sklon termomechanických křivek. Největšího rozdílu změn rozměrů obou vzorků je dosaženo na konci měření. To je z důvodu, že rozměr vzorku 1.1 se během měření v ose Z zmenšil, zatímco rozměr vzorku 2.1, u kterého měřící sonda doléhala přímo na prokov, se během měření v ose Z zvětšil. Tuto skutečnost si můžeme prohlédnout na grafu 7.

### 2.3.4.3 Vzorek 3.2 – vzorek 1.2



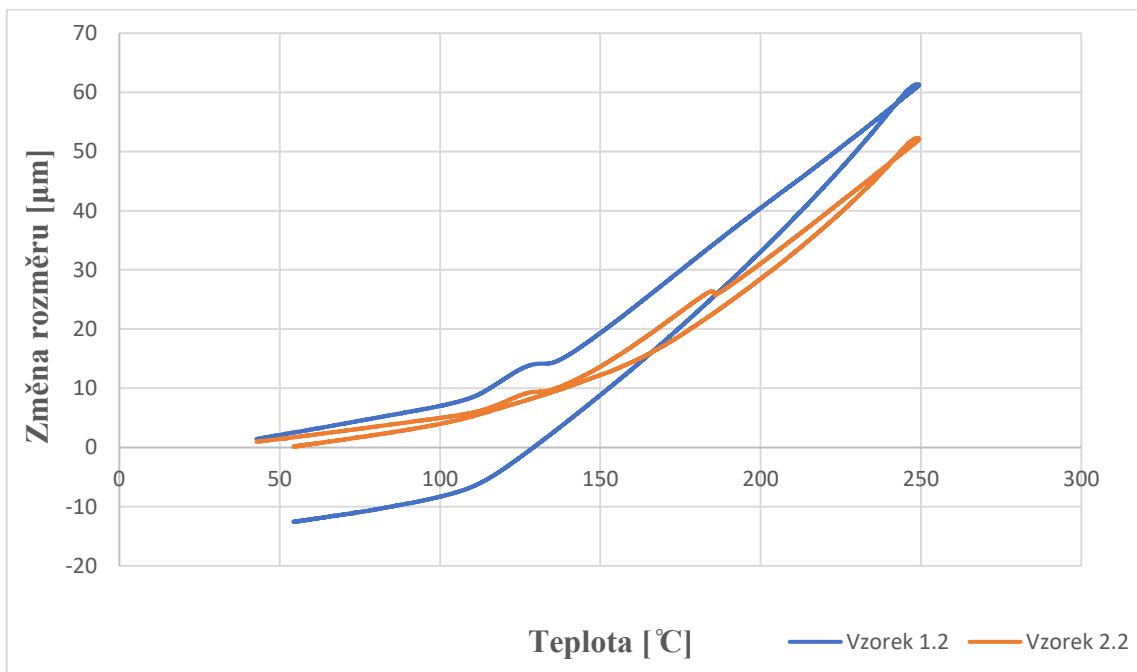
Graf 9: Závislost změny rozměru  $\Delta l$  na změně teploty  $T$  pro vzorky 3.2 a 1.2



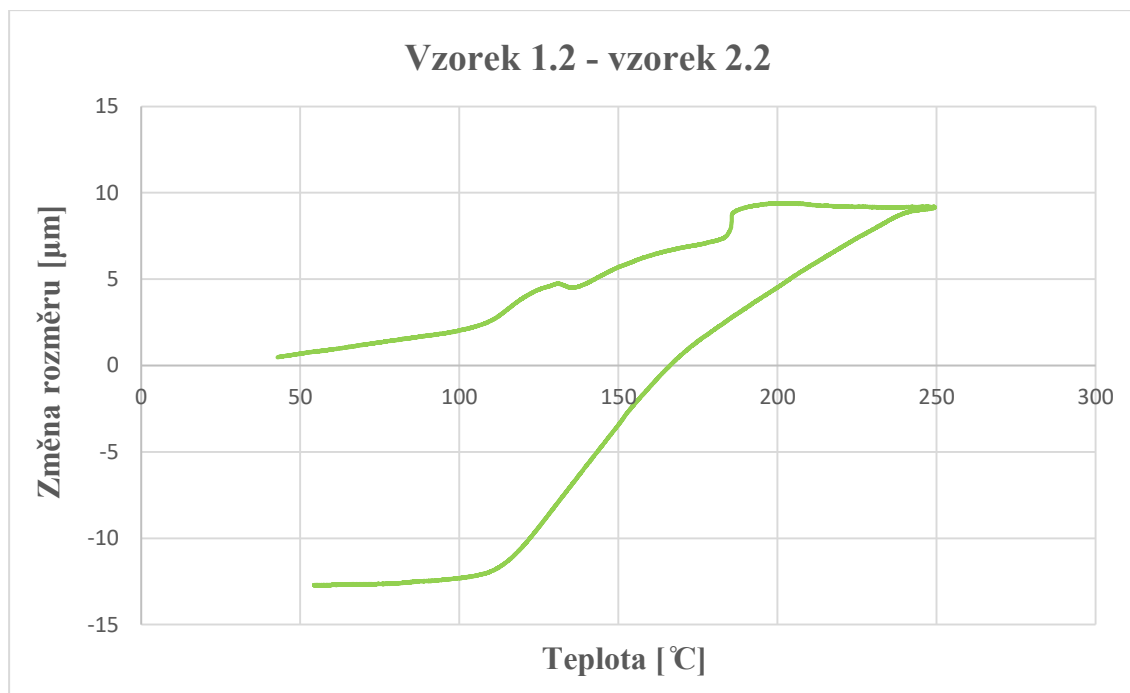
Graf 10: Výsledek rozdílu vzorek 3.2 – vzorek 1.2

Průběhy, které si můžeme prohlédnout na grafech 9 a 10 se svým chováním shodují s průběhy na grafech 5 a 6, které se týkají stejných vzorků ovšem z první sady. Z tohoto důvodu můžeme říct, že nám tyto průběhy potvrzují vlivy prokovů na roztažnost DPS popsané v kapitole 2.3.4.1, která se týkala rozdílu vzorek 3.1 – vzorek 1.1. K celkovému zhodnocení porovnání vzorků č.1 a č. 3 lze říci, že vzorek obsahující prokovy má ve výsledku menší změnu rozměru. Vzorek bez pokovených otvorů dosahuje nižší hodnoty teploty skelného přechodu  $T_{g1}$ . Vliv prokovů na roztažnost DPS se nejvíce projevuje v oblasti teplot, ve kterých se vzorek nachází v kaučukovitém stavu.

#### 2.3.4.4 Vzorek 1.2 – vzorek 2.2



Graf 11: Závislost změny rozměru  $\Delta l$  na změně teploty  $T$  pro vzorky 1.2 a 2.2



*Graf 12: : Výsledek rozdílu vzorek 1.1 – vzorek 2.1*

Průběhy vykreslené v grafech 11 a 12 se svým chováním taktéž shodují s průběhy na grafech 7 a 8 (stejně jako u vzorků č.1 a č.3), které se týkají stejných vzorků ovšem z první sady. Proto můžeme říci, že vlastnosti týkající se porovnání těchto vzorků jsou totožné a byly již popsány v části 2.3.4.2, která se týkala rozdílu vzorek 1.1 – vzorek 2.1. Na závěr lze říci, že u vzorku, který neobsahuje prokovy byla změřena větší celková změna rozměru. Dále vzorek, co obsahuje prokov, se při dosažení maximální změřené teploty roztáhl méně než vzorek bez prokovu. Vzorku, který byl měřen tím způsobem, že měřící sonda doléhala přímo na prokov, se měřený rozměr v ose Z během měření zvětšil.



### 3) Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s různými materiály a technologiemi výroby desek plošných spojů. Dále u vybraných desek plošných spojů provést analýzu termomechanického chování s ohledem na přítomnost prokovů. Samotná bakalářská práce je rozdělena na dvě části. V první části mé práce jsem se seznámil se základní problematikou desek plošných spojů a vypracoval rešerši, která čtenáři poskytuje základní informace o dílčích oblastech týkajících se DPS, jako jsou například jednotlivé druhy, typy výroby, povrchové úpravy a vady desek plošných spojů.

Druhá část bakalářské práce je věnována experimentu, ve kterém jsem odměřil a vyhodnotil 2 sady vzorků na termomechanickém analyzátoru Q400. Všechny vzorky byly vyhodnoceny v oblasti teploty skelného přechodu, celkové změny rozměru v ose Z a koeficientu teplotní roztažnosti. Celkový rozměr v ose Z se u vzorků, u kterých doléhala měřicí sonda přímo na desku, zmenšil. Naopak u vzorků, u kterých měřicí sonda doléhala na prokovy, se celkový rozměr v ose Z zvětšil. Z toho plyne výsledek, že měď je méně teplotně závislá než sklolaminát. Celková změna rozměru v ose Z se u měřených vzorků pohybovala v rozmezí 0,1985–12,54  $\mu\text{m}$ . Teploty skelného přechodu  $T_{g1}$  a  $T_{g2}$  se u všech vzorků pohybovaly v rozmezí 124–158  $^{\circ}\text{C}$ . Hodnota teploty  $T_{g2}$  v oblasti chlazení vzorku byla naměřena ve většině případů větší než hodnota teploty  $T_{g1}$  v oblasti ohřívání vzorku. Koeficienty teplotní roztažnosti  $\alpha$  jsem vyhodnocoval jak v oblasti zahřívání ( $\alpha_1, \alpha_2$ ), tak v oblasti chlazení ( $\alpha_3, \alpha_4$ ) vzorku. Každou z těchto oblastí lze rozdělit na dvě, které jsou odděleny teplotou skelného přechodu  $T_{g1}$ , případně  $T_{g2}$ . Z naměřených hodnot vidíme, že koeficienty teplotní roztažnosti  $\alpha_1$  a  $\alpha_4$ , které se týkají oblastí, ve které je materiál ve sklovitém stavu, dosahují menších hodnot než koeficienty teplotní roztažnosti  $\alpha_2$  a  $\alpha_3$ , které se týkají oblastí, ve které je materiál ve stavu kaučukovitém. Lze tedy říci, že po překročení teploty skelného přechodu  $T_{g1}$  ze stavu sklovitého do stavu kaučukovitého, se koeficient teplotní roztažnosti  $\alpha$  výrazně zvýší. Naopak, když materiál přejde přes teplotu skelného přechodu  $T_{g2}$  ze stavu kaučukovitého do stavu sklovitého, se koeficient teplotní roztažnosti  $\alpha$  výrazně sníží. Data z naměřených závislostí jsem vyhodnocoval v programu TA Universal Analysis. V případě vyhodnocování koeficientů teplotní roztažnosti  $\alpha$  jsem si výsledky z programu TA Universal Analysis zkontroloval výpočtem. Hodnoty se od sebe lišily jen minimálně.

Dále jsem provedl porovnání první a druhé sady vzorků, která před samotným měření prošla pecí. Z vyhodnocených dat je patrné, že u vzorků 1 a 3 z druhé sady byly naměřeny horší parametry než u vzorků z první sady. Výjimkou byl vzorek 2, u kterého se s nejvyšší pravděpodobností jednalo o chybu měření. Průchod pecí před měřením měl tedy na vzorky negativní vliv. Nakonec jsem provedl odečítání grafů roztažnosti příslušných vzorků, abych posoudil, jaký vliv na roztažnost mají prokovy, které vzorky obsahují. Z výsledných grafů jsem zjistil, že vzorky obsahující prokovy mají ve výsledku menší změnu rozměru, dosahují větší teploty skelného přechodu  $T_{g1}$  a menší roztažnosti. To nám potvrzuje fakt, že substrát disponuje větším koeficientem teplotní roztažnosti než měď, ze které jsou prokovy vyrobeny.

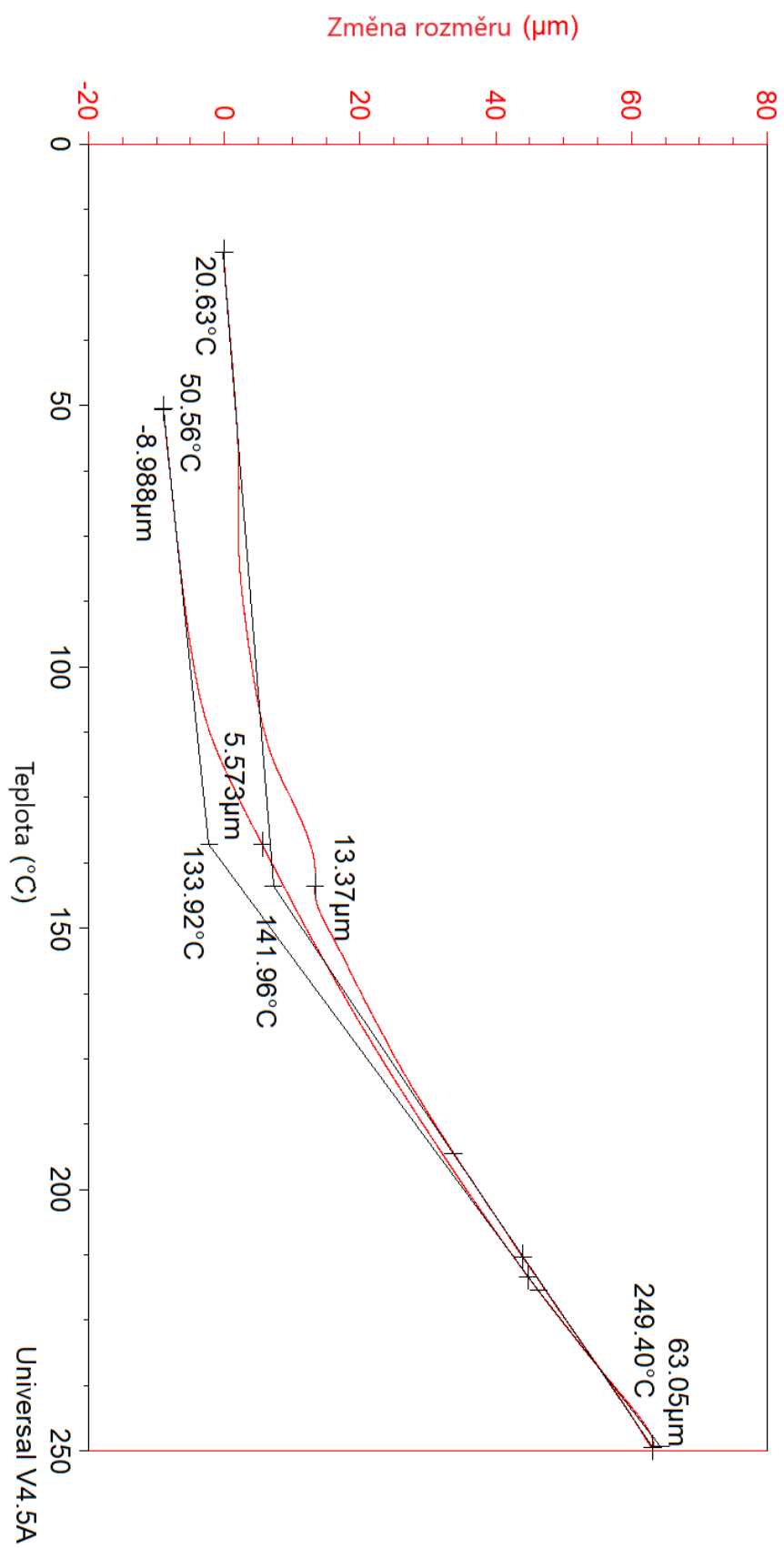
## Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] MACH P., Skočil V., Urbánek J.: *Pouzdrění aktivních součástek, plošné spoje*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, ISBN: 80-01-02392-3
- [2] Mergl L.: *Testování desek plošných spojů* [online]. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Tomáš Řeřicha. Dostupné z:  
<https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/14254/1/Bakalarska%20prace%20Lukas%20Mergl.pdf>
- [3] prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.: *Z historie plošných spojů* [online]. 2010 [cit. 2020-03-06]. Dostupné z:  
<https://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:4644/z-historie-plosnych-spoju>
- [4] Kaltmeyer J.: *Technologie pro výrobu desek plošných spojů* [online]. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D. Dostupné z:  
[https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76500/F3-BP-2018-Kaltmeyer-Jan-Kaltmeyer\\_tecnologie%20pro%20vyrobu%20DPS.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76500/F3-BP-2018-Kaltmeyer-Jan-Kaltmeyer_tecnologie%20pro%20vyrobu%20DPS.pdf?sequence=-1&isAllowed=y)
- [5] Drápala J., Kursá M.: *Elektrotechnické materiály* [online]. Vyd. 1. Ostrava, 2012, ISBN: 978-80-248-2570-0 Dostupné z:  
<http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/Elektrotechnicke%20materialy.pdf>
- [6] Mittal A.: *PCB Substrates: Knowing Your Dielectric Material's Properties*. *Sierra circuits* [online]. 2015 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z:  
<https://www.protoexpress.com/blog/pcb-substrates-knowing-dielectric-materials-properties/>
- [7] Starý J., Kahle P.: *Plošné spoje a povrchová montáž* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2011. Dostupné z:  
<https://docplayer.cz/2635621-Ing-jiri-stary-ph-d-ing-petr-kahle-plosne-spoje-a-povrchova-montaz.html>

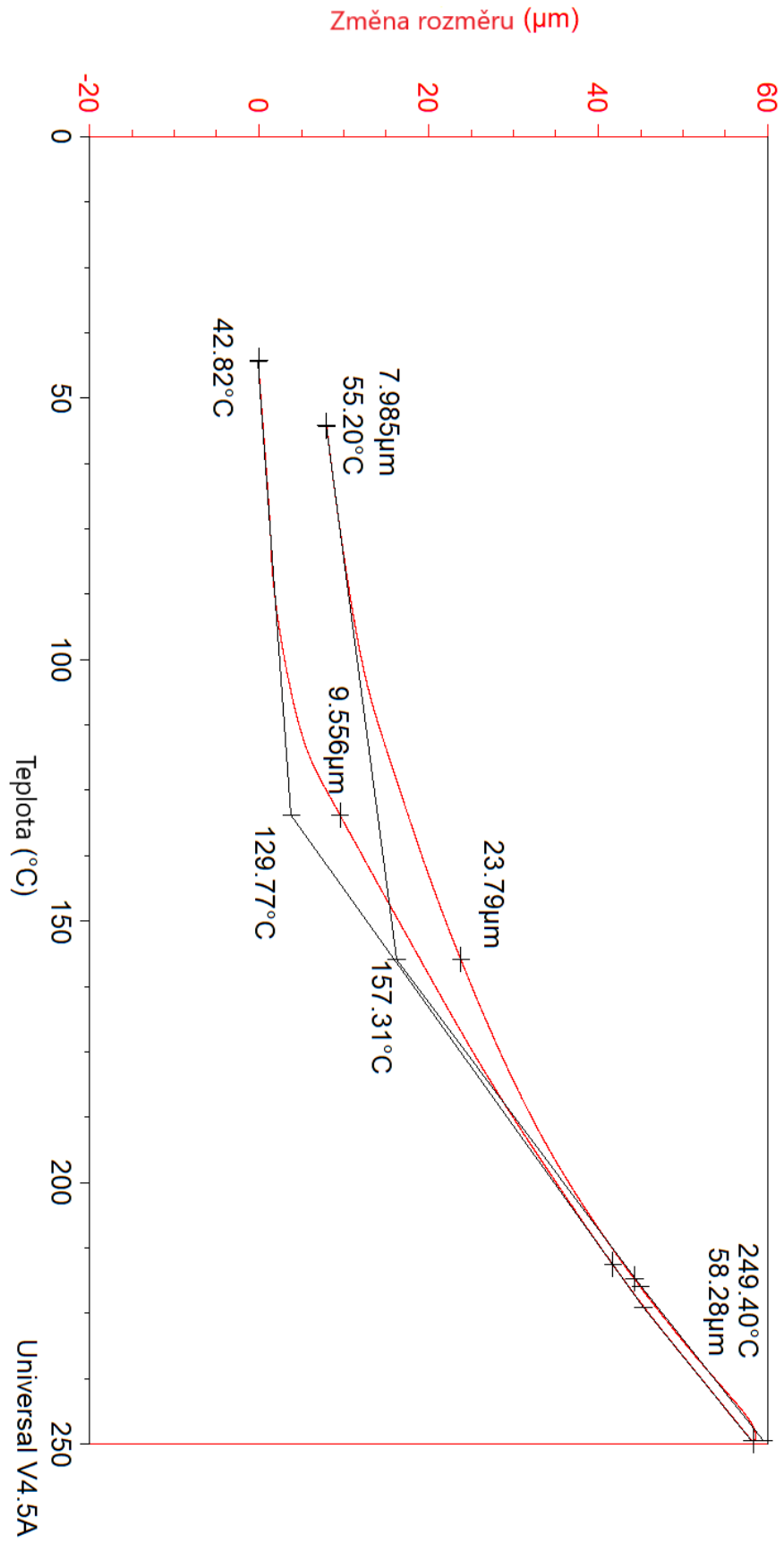
- [8] Fridrichovský M.: *Diagnostika desek plošných spojů* [online]. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Karel Hromadka.  
Dostupné z:  
<https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18835/1/Diagnostika%20DPS%2c%20Fridrichovsky%20Martin%20PDF.pdf>
- [9] Šandera J., Starý J.: *Mikroelektronické praktikum* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2015.  
Dostupné z:  
<https://docplayer.cz/46150621-Mikroelektronicke-praktikum-bmep.html>
- [10] Belucz J.: *Povrchové úpravy desek plošných spojů* [online]. 2019 [cit. 2020-01-13].  
Dostupné z:  
<https://www.dps-az.cz/vyroba/id:59606/povrchove-upravy-desek-plosnych-spoju>
- [11] DUŠEK K.: *Pájení* [online]. České vysoké učení technické v Praze, 2019. Přednášky z předmětu Svařování a pájení v elektrotechnice BVB13SPE – Přednášky, Studijní materiály - 11.Přednáška PÁJENÍ ÚVOD I  
Dostupné z:  
<https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=4183>
- [12] Hoch P.: *Vliv povrchových úprav DPS na pájitelnosti* [online]. Plzeň, 2015. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Martin Hirman.  
Dostupné z:  
[https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18872/1/BP\\_Hoch\\_Petr.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18872/1/BP_Hoch_Petr.pdf)
- [13] Jičínský J.: *Environmentální vlivy a pájitelnosti povrchových úprav desek plošných spojů* [online]. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.  
Dostupné z:  
<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12173/final-thesis.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- [14] Ševčík J.: *Spolehlivost prokovů u desek plošných spojů* [online]. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce : doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.  
Dostupné z:  
[https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/74421/F3-DP-2018-Sevcik-Jan-Spolehlivost\\_prokovu\\_u\\_desek\\_plosnych\\_spoju.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/74421/F3-DP-2018-Sevcik-Jan-Spolehlivost_prokovu_u_desek_plosnych_spoju.pdf?sequence=-1&isAllowed=y)

- [15] Šebesta J.: *Skryté vady desek plošných spojů – část 1* [online]. 2011 [cit. 2020-01-14].  
Dostupné z:  
<https://www.dps-az.cz/vyroba/id:5586/skryte-vady-desek-plosnych-spoju-cast-1>
- [16] Šebesta J.: *Skryté vady desek plošných spojů – část 2* [online]. 2011 [cit. 2020-01-14].  
Dostupné z:  
<https://www.dps-az.cz/vyroba/id:6272/skryte-vady-desek-plosnych-spoju-cast-2>
- [17] Belucz J.: *Delaminace – co to vlastně je?* [online]. 2017 [cit. 2020-01-14].  
Dostupné z:  
<https://www.dps-az.cz/vyroba/id:51900/delaminace-co-to-vlastne-je->
- [18] Polanský R.: *Teoretické a praktické aspekty termomechanické analýzy. Elektrorevue* [online]. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření. 2008. ISSN 1213-1539  
Dostupné z:  
<http://docplayer.cz/25995649-Teoreticke-a-prakticke-aspekty-termomechanicke-analyzy.html>
- [19] *UniCRE - UniCRE - Termomechanický analyzátor TA Q400* [online].  
Dostupné z:  
<https://www.unicre.cz/component/phocagallery/7-labpokrinstanal/detail/153-termomechanicky-analyzator-ta-q400?tmpl=component&Itemid=1>
- [20] Zahradník V.: *Studium vlivu latentního tepla u pájení přetavením* [online]. Praha, 2015. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce : doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.  
Dostupné z:  
[https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/62099/F3-BP-2015-Zahradnik-Vit-Studium\\_vlivu\\_latentního\\_tepla\\_u\\_pajeni\\_pretavenim.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/62099/F3-BP-2015-Zahradnik-Vit-Studium_vlivu_latentního_tepla_u_pajeni_pretavenim.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

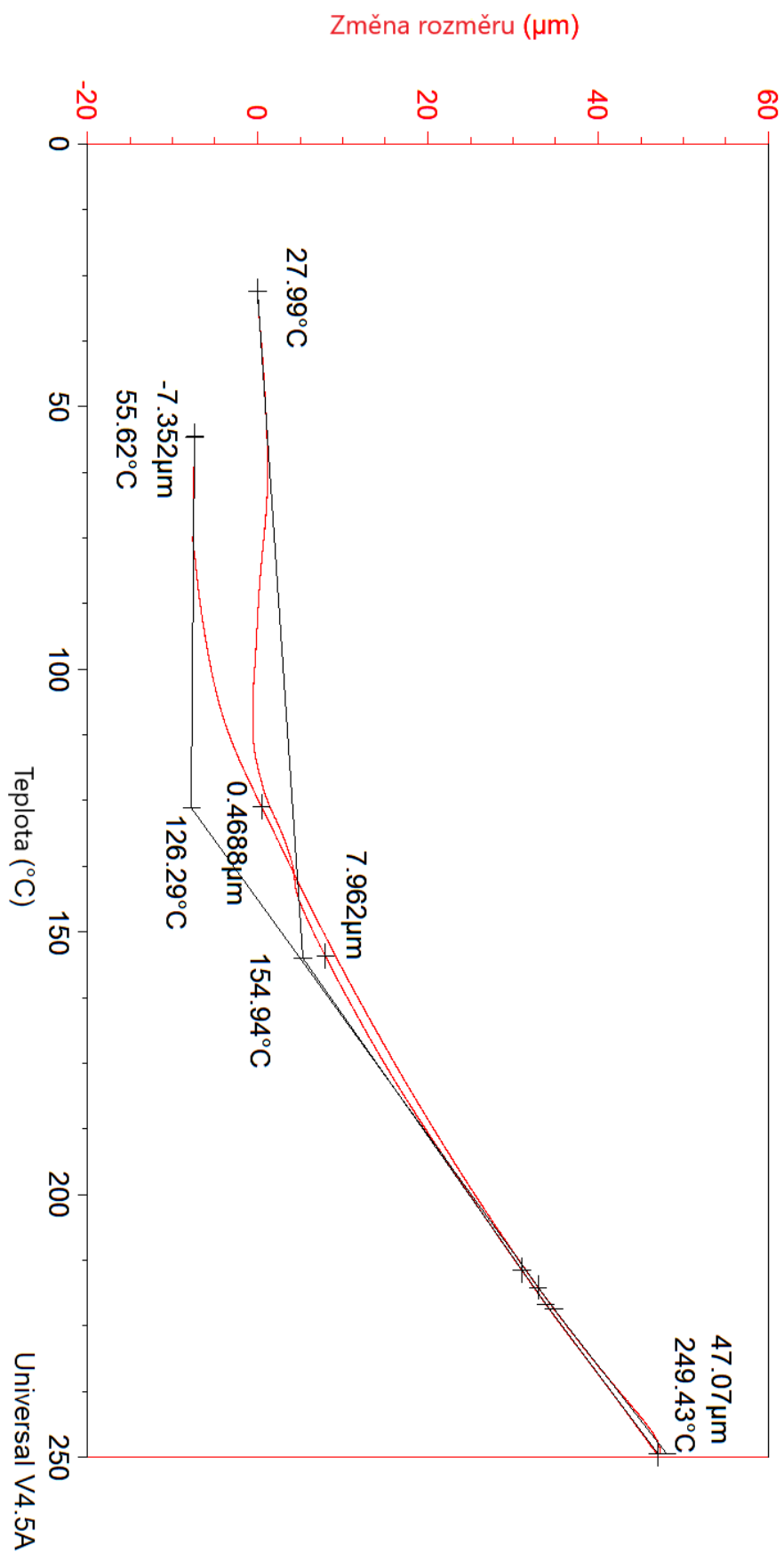
Příloha 1: Grafická závislost  $\Delta l = f(T)$  pro vzorek 1.1



Příloha 2: Grafická závislost  $\Delta l = f(T)$  pro vzorek 2.1

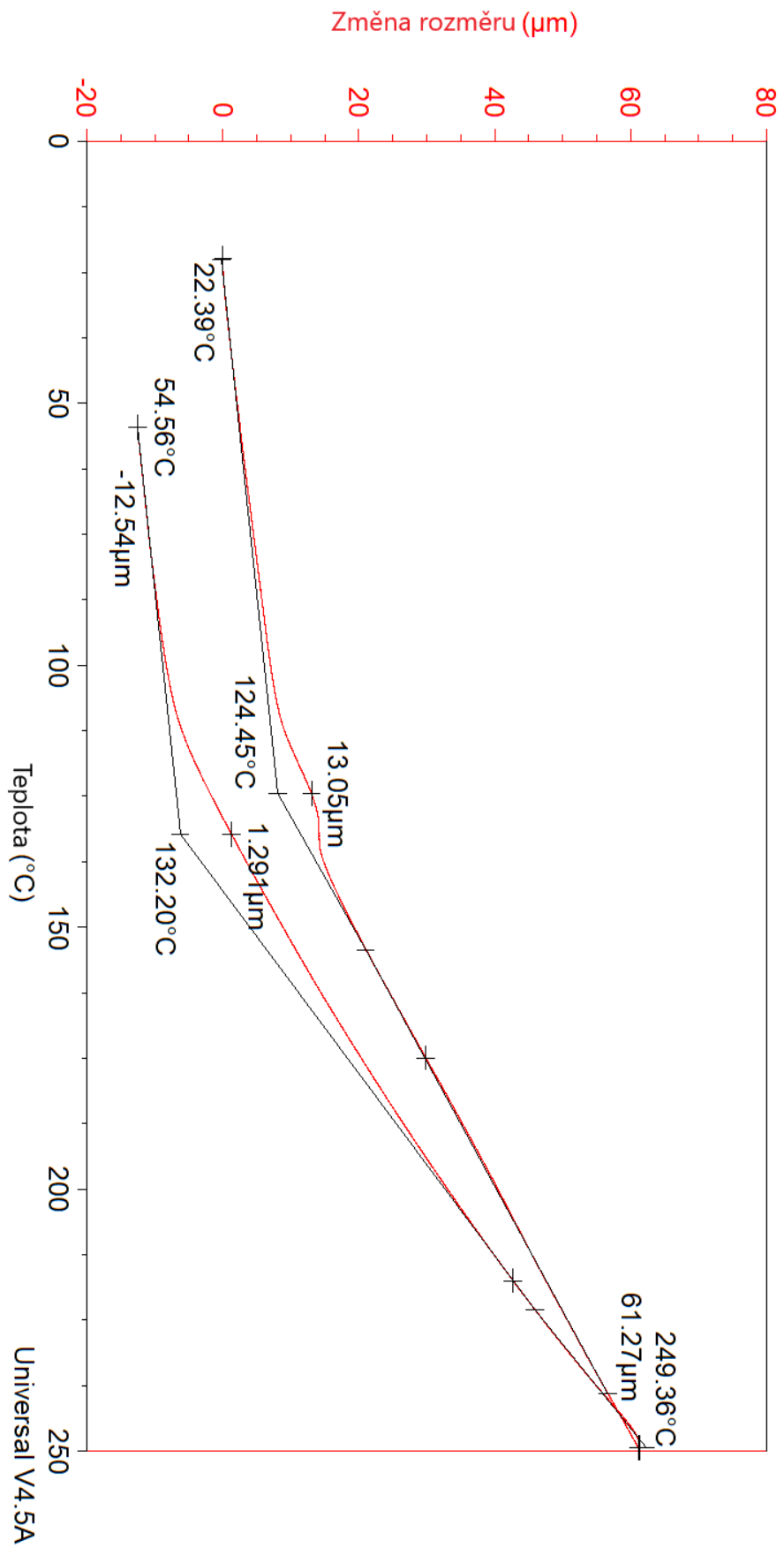


Příloha 3: Grafická závislost  $\Delta l = f(T)$  pro vzorek 3.1

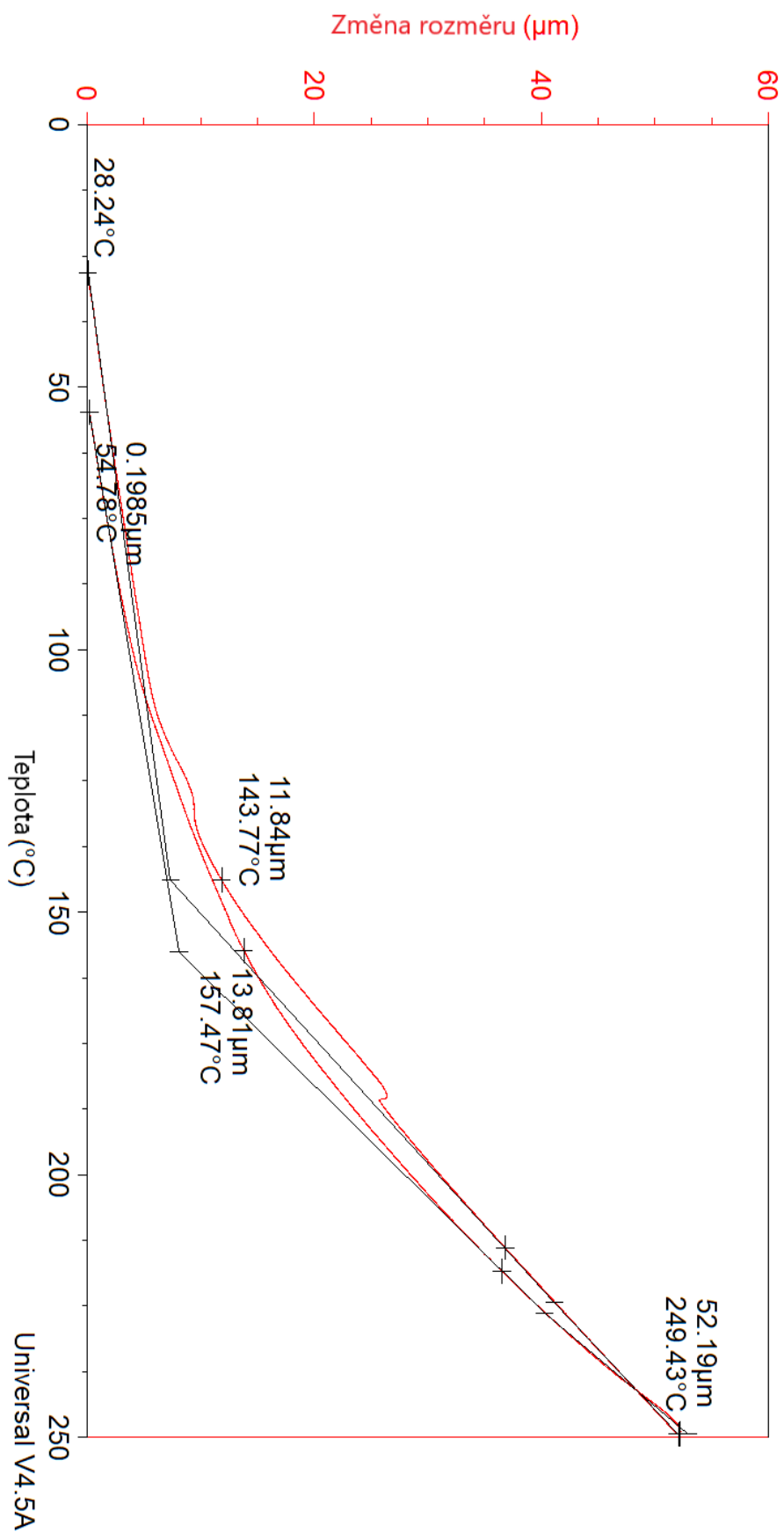




Příloha 4: Grafická závislost  $\Delta l = f(T)$  pro vzorek 1.2



Příloha 5: Grafická závislost  $\Delta l = f(T)$  pro vzorek 2.2



Příloha 6: Grafická závislost  $\Delta l = f(T)$  pro vzorek 3.2

