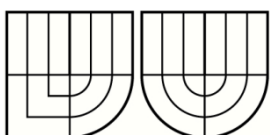


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

## Vliv rozdílné tepelné kapacity DPS a součástek na podélný teplotní profil u pájení přetavením

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

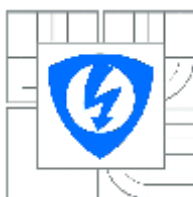
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

BC. MARTIN PROCHÁZKA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

## Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Elektrotechnická výroba a management

**Student:** Bc. Martin Procházka

**ID:** 98540

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2010/2011

### NÁZEV TĚMATU:

**Vliv rozdílné tepelné kapacity DPS a součástek na podélný teplotní profil u pájení přetavením**

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku pájení přetavením a metody přenosu tepla.

Navrhněte testovací DPS se simulovanými SMD pouzdry rozdílných tepelných kapacit a přípravek pro současné měření teplotních profilů na testovací a produkční DPS.

Zohledněte nastavení teplot jednotlivých teplotních zón laboratorní přetavovací pece DIMA SMRO 0180, rozdílných tepelných kapacit součástek i DPS na podélný teplotní profil testovací DPS při definované rychlosti pohybu dopravníku. Porovnejte s teoretickými výpočty.

Navrhněte matematický aparát pro predikci a optimalizaci teplotního profilu produkční DPS. Vycházejte z analýzy měřených teplotních profilů testovací DPS a jediného profilu produkční DPS.

Diskutujte shodu prakticky dosažených výsledků na produkční DPS s analyticky predikovanými.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 26.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Starý, Ph.D.

**prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.**

*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## *ABSTRAKT*

Tato diplomová práce se zabývá zejména predikováním teplot na součástkách a DPS během pájení přetavením. V teoretické části popisuje zejména pájení přetavením, druhy šíření tepla a teplotní profily. Praktická část je rozdělena na predikování teplot při zastaveném dopravníku a na predikci teplot v případě, kdy je dopravník v pohybu. V obou částech je porovnání naměřených teplot s predikovanými teplotami, z čehož je patrná míra úspěšnosti predikce. Poslední částí této práce je simulační část, která napomáhá správnému pochopení probírané problematiky.

## *ABSTRACT*

This thesis mainly deals with the prediction of temperature on the components and the PCB during reflow soldering. The theoretical part describes the particular solder reflow process, types of heat transfer and temperature profiles. The practical part is divided into forecasting temperatures if the conveyor is stopped and the temperature predictions when the conveyor is in motion. In both parts of the measured temperature is compared with the predicted temperatures, which show the success rate of prediction. The last part of this work is part of the simulation, which helps in proper understanding of the issues discussed.

## *KLÍČOVÁ SLOVA*

Pájení přetavením, termočlánek, pouzdro, teplo, tepelná kapacita, měď, FR4, predikce, dopravník, teplotní profil.

## *KEYWORDS*

Reflow soldering, thermocouple, package, heat, heat capacity, copper, FR4, prediction, conveyor, temperature profile.

### *Bibliografická citace díla:*

PROCHÁZKA, M. *Vliv rozdílné tepelné kapacity DPS a součástek na podélný teplotní profil u pájení přetavením – diplomová práce.* Brno 2011. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D. FEKT VUT v Brně.

### *Prohlášení:*

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Vliv rozdílné tepelné kapacity DPS a součástek na podélný teplotní profil u pájení přetavením jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 25. května 2011

.....

podpis autora

### *Poděkování:*

Děkuji vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé práce. Dále děkuji panu doc. Ing. Jiřímu Maxovi, Ph.D., panu Františku Chudáčkově a panu Radku Vespalcovi za odbornou pomoc a cenné rady při zpracování mé práce.

# Obsah

ÚVOD .....	6
1. TEORETICKÁ ČÁST .....	7
1.1. PÁJENÍ .....	7
1.1.1. PÁJENÍ PŘETAVENÍM .....	7
1.2. ŠÍŘENÍ TEPLA .....	10
1.2.1. ŠÍŘENÍ TEPLA VEDENÍM .....	12
1.2.2. ŠÍŘENÍ TEPLA PROUDĚNÍM .....	13
1.2.3. ŠÍŘENÍ TEPLA ZÁŘENÍM .....	16
1.3. TEPLOTNÍ PROFILY .....	17
1.3.1. PODÉLNÝ TEPLOTNÍ PROFIL .....	17
1.3.2. PŘÍČNÝ TEPLOTNÍ PROFIL .....	19
1.4. TERMOČLÁNKY .....	19
1.5. ANALOGIE MEZI TEPELNÝM A ELEKTRICKÝM OBVODEM .....	21
2. PRAKTICKÁ ČÁST .....	23
2.1. DPS .....	23
2.2. PEC DIMA SMRO 0180 .....	27
2.3. NAMĚŘENÉ HODNOTY .....	28
2.3.1. MĚŘENÍ PŘI ZASTAVENÉM DOPRAVNÍKU .....	28
2.3.2. MĚŘENÍ PŘI ZAPNUTÉM DOPRAVNÍKU .....	41
2.3.2.1. METODA NÁHRADNÍ MATEMATICKÉ FUNKCE .....	41
2.3.2.2. METODA PODOBNOSTI TEPELNÝCH KAPACIT .....	46
3. SIMULAČNÍ ČÁST .....	49
4. DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....	51
5. ZÁVĚR .....	53
6. SEZNAM OBRÁZKŮ .....	54
7. SEZNAM TABULEK .....	55
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	56
9. SEZNAM SYMBOLŮ .....	58
10. SEZNAM ZKRATEK .....	60
11. PŘÍLOHY .....	61

# ÚVOD

Pájení přetavením je v současné době zřejmě nejrozšířenější způsob pájení elektronických součástek. A jako takové je předmětem neustálé snahy o co nejlepší zdokonalení technologického procesu, zajištění kvality pájeného spoje, zajištění co nejlepší spolehlivosti výsledné DPS, atd. Se spolehlivostí zapájené DPS úzce souvisí problematika tepelného managementu, neboť je velmi důležité, aby např. během procesu pájení nedošlo k přehřátí součástek (a tím vzniku nebezpečného pnutí a následného prasknutí součástky). K zajištění bezproblémového procesu pájení a následného užívání DPS je užitečné znát, jaká teplota v tom či onom místě DPS a součástek během přetavení bude. Předvídání těchto teplot je hlavním předmětem této práce.

Tato práce je rozdělena na 3 hlavní části – teoretickou, praktickou a simulační. V teoretické části je vysvětleno pájení jako takové a podrobněji popsáno pájení přetavením, které je předmětem této práce. Dále je zde popsán přenos tepla vedením, prouděním i zářením, jsou zde popsány teplotní profily pro reflow pájení – podélný a příčný – a přístroje používané k jejich určení. Nakonec je stručně zmíněna analogie mezi tepelným a elektrickým obvodem.

V praktické části popíšu postup při predikování teplot součástek během pájení přetavením. K této predikci využiji pouze základní informace – teplotu zářičů, tepelnou kapacitu materiálu a čas, ve kterém bude teplota předvídána. Je zde také vytvořen jednoduchý program, který tuto predikci usnadňuje.

Ve třetí a poslední části – simulační – nastíním problémy při rozložení tepla uvnitř používané přetavovací pece, což vede k jistým problémům při predikci teplot. Dále zde uvedu některé informace, které bude užitečné využít v budoucnu při potenciálním navázání na tuto práci.

# 1. *Teoretická část*

## 1.1. *Pájení*

Pájení je proces, se kterým se v dnešní době setkáváme téměř kdekoli. Ve své podstatě je to metalurgické spojení materiálů stejného nebo rozdílného chemického složení pájkou, která má teplotu tavení nižší než spojované materiály. Spoj vzniká vlivem prolnutí částic (difúze) a částečně může vzniknout také přilnutím materiálů (adheze). V praxi se však pájení používá nejenom k připevnění součástek k deskám plošných spojů, ale používá se také v klempířství, automobilovém průmyslu, atd. [7]

Pevnost pájeného spoje je dána pevností mezivrstvy pájený kov – pájka- pájený kov. Mezi tloušťkou této mezivrstvy a pevností pájeného spoje platí nepřímá úměra – tzn. pevnost pájeného spoje je tím větší, čím má mezivrstva menší tloušťku.

### 1.1.1. *Pájení přetavením*

V současné době, kdy se používají stále menší a menší elektronické součástky, je nejčastěji používaná metoda pájení pájení přetavením (reflow pájení). Tento typ pájení má oproti strojnímu pájení vlnou řadu výhod [5]:

- pájka a tavidlo se vhodným postupem aplikují pouze v místech, kde je třeba => úspora materiálu a aplikace pájky a tavidla v přesně definovaném poměru
- je vyloučena "nekontrolovatelná" přítomnost nečistot, které se mohou dostat na pájený spoj při pájení vlnou, případně jiných postupech
- pájecí proces probíhá bez teplotních rázů, čímž dochází k menšímu namáhání součástek
- přesný technologický postup aplikace pasty umožňuje dosáhnout vyšší hustoty montáže
- je možná oboustranná montáž SMD

Princip u pájení přetavením je opačný, než u strojního pájení vlnou (SPV). U SPV se přivádí již roztavená pájka na pájené spoje, kde následně po ztuhnutí pájky dojde ke spájení spojů. Naopak u pájení přetavením se na pájené spoje nanese nejprve pájecí pasta, u které dojde zvýšením teploty na požadovanou hodnotu k jejímu přetavení.

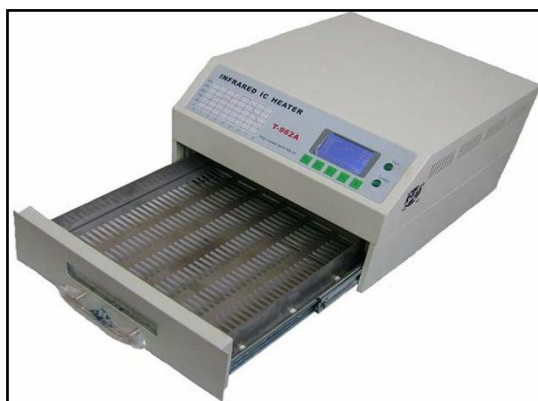
Pájecí pasta se skládá z 2 hlavních složek – tavidla a prášková pájky. Tavidlo má následující funkce [5]:

- reaguje s oxidy a nečistotami na spojovaném povrchu i pájce a brání jejich opětovné reoxidaci
- odstraňuje reakční produkty z pájeného povrchu a umožňuje pájce dostat se do pracovní vzdálenosti s kovovými povrchy
- snižuje povrchové napětí pájecí slitiny a zvyšuje povrchové napětí pájeného povrchu; umožní tak pájce, aby se dobře roztekla
- zlepšuje přenos tepla od tepelného zdroje k pájenému místu
- v pájecí pastě suspenduje kuličky pájky, řídí tixotropní a reologické vlastnosti a „zapouzdřuje“ pohyblivé ionizovatelné zbytky po procesu pájení

Při reflow pájení jsou používány speciální zařízení, tzv. přetavovací pece. Tyto pece můžeme rozdělit na 2 hlavní skupiny:

- Vsázkové pece – jsou určeny pro laboratorní účely nebo výrobu v malých sériích. Jejich velkou výhodou je nižší cena a malé rozměry. Naopak mezi nevýhody patří horší ovládání, často nutný zásah obsluhy, malý počet zón. S těmito pecemi je práce také celkově pomalejší.





Obr. 1: Vsázková přetavovací pec, typ T-962

- In-line pece – jsou určeny pro výrobu ve středních až velkých sériích. Oproti vsázkovým pecím jsou sice mnohem větší a také dražší. Naopak u těchto pecí je možné mnohem přesněji nastavovat jednotlivé parametry, práce s těmito pecemi je mnohem rychlejší a obsluha nemusí tak často zasahovat.



Obr. 2: In-line přetavovací pec, typ FC220

V rámci in-line pecí existuje několik různých typů pecí, které se od sebe odlišují zejména cenou, způsobem ohřevu a chlazení, počtem zón, možností použití ochranné atmosféry, atd.

## 1.2. Šíření tepla

Teplo je vnitřní energie, kterou těleso přijme (nebo odevzdá) od jiného tělesa (jinému tělesu) při tepelné výměně. Tato energie se přenáší z jednoho bodu prostoru do druhého vlivem rozdílu teplot těchto bodů. Při přenosu tepla se uplatňuje II. termodynamický zákon, který říká, že teplo nemůže při styku dvou těles různých teplot samovolně přecházet z tělesa chladnějšího na těleso teplejší. To znamená, že teplo vždy plyne z teplejšího tělesa ke chladnějšímu. Ve skutečnosti přenášejí rychleji se pohybující molekuly látky část své energie na molekuly pomalejší. Takto se rychlejší molekuly zpomalí a pomalejší molekuly se naopak zrychlí. Energie se mezi molekulami předává do té doby, dokud nebudou mít všechny molekuly stejnou energii (a tím i teplotu).

Teplo může být přenášeno z jednoho prostředí na druhé vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) nebo zářením (radiací). Vedením a prouděním se tepelná energie může šířit pouze v prostředí, které je vyplněno látkou. Příčinou šíření je neustálý pohyb částic hmoty. Vzájemným působením mezi jednotlivými částicemi (např. srážkami) dochází k předávání kinetické energie a to tak dlouho, dokud nedojde k vyrovnání teplot. Tepelné záření se svojí povahou odlišuje od vedení a proudění, neboť tepelná energie se může přenášet i v prostoru, který není vyplněn látkou (tedy ve vakuu). Důvodem je skutečnost, že sálání představuje elektromagnetické záření, které ke svému přenosu hmotu nepotřebuje.

V praxi se téměř nesetkáme s případem, kdy se teplo šíří pouze jedním z uvedených způsobů. Většinou se na šíření podílí dva, výjimkou nejsou ani všechny tři typy zároveň.

Při popisu šíření tepla je nutné zavést některé základní veličiny, pomocí kterých lze toto šíření popsat.

Teplo,  $Q$ , je vnitřní energie, kterou těleso přijme (nebo odevzdá) při tepelné výměně jinému tělesu. Pokud při přenosu tepla nedojde k fázové přeměně látek, potom platí:

$$Q = m c \Delta T, \quad (1)$$

kde  $Q$  je teplo [J],  $m$  je hmotnost tělesa [kg],  $c$  je měrná tepelná kapacita [J/kg K] a  $\Delta T$  je rozdíl teplot mezi tělesy [K].

Tepelný tok,  $\Phi$ , udává rychlost průchodu tepla danou plochou. Je to ale také výkon přenášený při průchodu tepla danou plochou [2]:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

kde  $dQ$  je teplo, které projde zvolenou plochou za určitý časový interval  $dt$ . Číselně je tepelný tok roven teplu, které projde danou plochou za jednotku času. Jednotkou tepelného toku je [W]. Po dosazení do rovnice (1) dostaneme pro tepelný tok vtaž:

$$\Phi = m c \frac{d\vartheta}{dt} = C \frac{d\vartheta}{dt}, \quad (3)$$

kde  $C$  je tepelná kapacita látky.

Ztrátový tepelný tok,  $\Phi_z$ , je výkon, který uniká z tělesa do okolí, aniž by byl využitý k účelu, ke kterému je zařízení určeno.

Hustota tepelného toku,  $q$ , označuje množství tepla  $Q$ , které projde určitou plochou o obsahu  $S$  za určitý časový interval  $dt$ . Platí [2]:

$$q = \frac{Q}{S dt} \quad (4)$$

Jednotkou hustoty tepelného toku je [W/m<sup>2</sup>].

Tepelná vodivost,  $\lambda$ , je rychlost, s jakou se šíří teplo v látce z míst o vyšší teplotě do míst o nižší teplotě. Jednotkou tepelné vodivosti je [W/m\*K]. Tepelná vodivost je závislá na teplotě (u kovů s rostoucí teplotou klesá, u polovodičů naopak roste) a na druhu materiálu. Tepelná vodivost je určena součinitelem tepelné vodivosti, který však bývá někdy označován přímo jako tepelná vodivost. Součinitel tepelné vodivosti je charakterizován jako výkon, který projde každým čtverečním metrem desky tlusté metr, jejíž jedna strana má teplotu o 1 Kelvin vyšší než druhá strana.

Tabulka 1: Vybrané materiály a jejich hodnoty tepelné vodivosti [2]

Materiál	Hliník	Měď	Sklo	FR4	Epoxid	Pájka Sn <sub>63</sub> Pb <sub>37</sub>	Vzduch
<b>Tepelná vodivost [W/m*K]</b>	220	375	0,984	0,23	0,28	37,6	0,0277

Tepelná kapacita, C, je množství tepla, které těleso přijme, když se ohřeje o 1K. Jednotkou je [J/K]. Pro tepelnou kapacitu platí vztah:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}, \quad (5)$$

kde  $Q$  je teplo, které bylo tělesu dodáno (nebo odebráno), a  $\Delta T = T_2 - T_1$  je rozdíl teplot mezi počátečním ( $T_1$ ) a koncovým ( $T_2$ ) stavem tělesa, kdy bylo teplo dodáno (nebo odebráno).

Měrná tepelná kapacita, c, je množství tepla, které tělesu dodáme (nebo odebereme), aby se ohřálo (nebo ochladilo) o 1°C (1K). Jednotkou je [J/kg K]. Pro měrnou tepelnou kapacitu platí:

$$c = \frac{Q}{m \Delta T}, \quad (6)$$

kde  $Q$  je teplo potřebné k ohřátí tělesa o hmotnosti  $m$  o teplotu  $\Delta T$ .

Tabulka 2: Vybrané materiály a jejich hodnoty měrné tepelné kapacity[2], [3]

Materiál	Hliník	Měď	Sklo	FR4	Epoxid	Pájka Sn <sub>63</sub> Pb <sub>37</sub>	Vzduch
<b>Měrná tepelná kapacita [kJ/kgK]</b>	0,888	0,380	0,761	0,60	0,60	0,167	1,01

### 1.2.1. Šíření tepla vedením

Teplo se šíří vedením, pokud k šíření dochází uvnitř pevného tělesa, nebo na kontaktní ploše dvou pevných těles. Molekuly s vyšší kinetickou energií odevzdávají část

své energie sousedním molekulám s nižší energií. Při vedení tepla dochází pouze k přenosu energie, nikoliv k přemístování hmoty.

V homogenním prostředí, které je tepelně izolováno od okolí, platí tzv. Fourierův zákon, podle něhož je hustota tepelného toku  $q$ , který prochází plochou  $dS$ , úměrná teplotnímu gradientu [2]. Platí:

$$q = -\lambda \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \right), \quad (7)$$

kde  $\left( \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \right)$  je gradient teploty ve směru kolmém k ploše  $dS$ . Záporné znaménko zde znamená, že tepelný tok má opačný směr než teplotní gradient.

Za předpokladu, že se teplo šíří pouze v jednom směru (ve směru osy  $x$ ), je množství tepla  $Q$  prošlého rovinnou plochou  $S$  kolmou na osu  $x$  za dobu  $\tau$  dáno vztahem

$$Q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{l} S \tau \quad (8)$$

V případě, že budeme rovnici (7) integrovat pro případ, že tepelný tok pochází jedním směrem prostředí délky  $L$  a stálého průřezu  $S$ , potom dostaneme vztah:

$$\Delta T = \frac{L \Phi}{\lambda S} \quad (9)$$

S ohledem na tento vztah můžeme definovat tepelný odpor prostředí  $W_{th}$  [K/W], pro který platí:

$$W_{th} = \frac{L}{\lambda S} \quad (10)$$

### 1.2.2. Šíření tepla prouděním

Při sdílení tepla prouděním dochází k proudění tekutiny o různé teplotě. Tento způsob šíření tepla nastává mezi dvěma sousedícími fázemi, z nichž alespoň jedna je kapalná. Nejčastěji se jedná o styk kapaliny a pevné látky (avšak může to být i plynná fáze).

Tepelný tok, který projde za určitý čas plochou  $S$ , je v tomto případě dán vztahem [2]:

$$\Phi = \alpha \Delta \vartheta S, \quad (11)$$

kde  $\alpha$  je koeficient přestupu tepla [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ] a  $\Delta\vartheta$  je rozdíl mezi teplotou povrchu tělesa a teplotou kapaliny. Upravíme-li předešlý vztah do podoby pro hustotu tepelného toku  $q$ , dostaneme vztah:

$$q = \alpha (T_S - T_A), \quad (12)$$

kde  $T_S$  je teplota na povrchu pevné látky a  $T_A$  je teplota kapaliny (plynu). Tento vztah se označuje jako Newtonův zákon.

Chceme-li použít rovnici pro výpočet tepelného toku  $\Phi$ , musíme určit koeficient přestupu tepla  $\alpha$ . Určení tohoto koeficientu je však velmi obtížné, proto se většinou určuje experimentálně. Výsledky získané pokusy lze zapsat do následujících dvou rovnic [2]:

$$Nu = B (Gr)^m (Pr)^n \dots\dots \text{volná konvekce} \quad (13)$$

$$Nu = C (Re)^p (Pr)^q \dots\dots \text{nucená konvekce}, \quad (14)$$

kde  $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Re$  a  $Pr$  jsou bezrozměrná čísla, která se zjistí experimentálně. Při pokusech je rovněž možné zjistit hodnotu konstant  $B$  a  $C$  a exponentů  $m$ ,  $n$ ,  $q$  a  $p$ .

Tabulka 3: Seznam vybraných bezrozměrných čísel [2]

Číslo	Značka	Vztah
Nusseltovo	Nu	$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda}$
Reynoldsovo	Re	$Re = \frac{\rho v D}{\eta}$
Prandtlovo	Pr	$Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda}$
Grasshofovo	Gr	$Gr = \frac{D^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\eta^2}$
Rayleighovo	Ra	$Ra = Gr * Pr$

V uvedených rovnicích je  $D$  charakteristický délkový rozměr,  $\rho$  je hustota,  $\beta$  je teplotní součinitel objemové roztažnosti,  $g$  je gravitační zrychlení,  $c_p$  je měrná tepelná kapacita při konkrétním tlaku,  $\eta$  je dynamická viskozita a  $v$  je charakteristická rychlost proudění kapaliny.

Pohybují-li se částice tekutiny pouze na základě rozdílu hustoty (nebo teploty) různých míst v kapalině, jedná se o volnou konvekci. Potom rovnice (13) přechází do jednoduššího tvaru:

$$Nu = B * (Ra)^n. \quad (15)$$

Vzhledem k velikosti  $Ra$  mohou nastat 2 typy proudění:

Tabulka 4: Typ proudění podle velikosti  $Ra$  [2]

Velikost $Ra$	Typ proudění
$Ra < 10^9$	Laminární
$Ra > 10^9$	Turbulentní

Pro čtvercovou vodorovnou desku, která simuluje pouzdro na DPS, byly konstanty  $B$  a  $n$  experimentálně stanoveny na hodnoty:

Tabulka 5: Konstanty platné pro volnou konvekci vzduchu [2]

Ohřívání	$Ra$	$B$	$n$	Charakteristický rozměr $L$
shora	$<10^9$	0,54	$1/4$	strana
zdola	$>10^9$	0,27	$1/4$	strana

Je-li naopak proudění tekutiny kolem teplosměnné plochy ovlivněno vnějším zdrojem (např. ventilátor), jedná se o nucenou konvekci. Při tomto typu konvekce určuje přechod od laminárního proudění k turbulentnímu velikost čísla  $Re$ . Je-li hodnota  $Re < 5 \cdot 10^5$ , probíhá laminární proudění a rovnice (14) nabývá tvaru:

$$Nu = 0,66 (Re)^{0,5} (Pr)^{0,33} \quad (16)$$

Naopak, je-li hodnota čísla  $Re > 5 \cdot 10^5$ , nastává proudění turbulentní a rovnici (13) lze vyjádřit následovně:

$$Nu = 0,037 (Re)^{0,8} (Pr)^{0,33} \quad (17)$$

### 1.2.3. Šíření tepla zářením

Na rozdíl od přenosu tepla vedením nebo prouděním se může prostřednictvím záření teplo přenášet i ve vakuu, tzn. bez zprostředkování přenosu látkovým prostředím. Množství vyzařovaného a přijímaného tepla závisí na rozdílu teplot tělesa a okolí a na barvě povrchu tělesa (tmavá a matná tělesa vyzařují a přijímají více tepla, světlá a lesklá tělesa vyzařují a přijímají méně tepla). Těleso, které vyzáří maximu své energie (nebo naopak přijme maximu energie na ně dopadající) se označuje jako těleso dokonale černé. Výkon vyzářený jednotkou plochy takového tělesa v celém spektru vlnových délek  $\lambda$  se označuje jako hustota zářivého toku,  $\psi_\varepsilon$ , pro kterou platí Stefan-Boltzmannův zákon [2]:

$$\psi_\varepsilon = \sigma \theta^4, \quad (18)$$

kde  $\sigma$  je Stefanova-Boltzmannova konstanta ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ).

Ve skutečnosti se však dokonale černé těleso vyskytuje pouze ojediněle. Většinou totiž tělesa vyzařují pouze část energie, kterou by vyzařovalo dokonale černé těleso se stejnou teplotou. Poměr:

$$\varepsilon = \frac{\psi}{\psi_\varepsilon}, \quad (19)$$

kde  $\psi$  je hustota zářivého toku skutečného tělesa při stejné teplotě, jakou má dokonale černé těleso s hustotou zářivého toku  $\psi_\varepsilon$ , se označuje jako sálavost (emisivita),  $\varepsilon$  [-]. Sálavost závisí na barvě tělesa a je větší u tmavých a matných těles, naopak tělesa světlá a lesklá mají sálavou malou.

Tepelný tok přenesený sáláním mezi dvěma tělesy vyjadřuje vztah [2]:

$$\Phi = \sigma S F_A F_\varepsilon (\theta_1^4 - \theta_2^4), \quad (20)$$

kde  $\theta_1^4$  je teplota povrchu tělesa, které energii vyzařuje,  $\theta_2^4$  je teplota povrchu tělesa, na které záření dopadá,  $S$  je plocha povrchu,  $F_A$  je úhlový součinitel,  $F_\varepsilon$  je součinitel vzájemné radiace a  $\sigma$  je Stefanova-Boltzmannova konstanta.



Tabulka 6: Úhlový součinitel a součinitel vzájemné radiace u některých jednoduchých uspořádání [2]

Povrchy	S	F <sub>A</sub>	F <sub>ε</sub>
Rovnoběžné a nekonečné roviny S <sub>1</sub> a S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub> nebo S <sub>2</sub>	1	$\frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right) - 1}$
Plocha S <sub>1</sub> obklopena plochou S <sub>2</sub> (S <sub>1</sub> << S <sub>2</sub> )	S <sub>1</sub>	1	ε <sub>1</sub>
Plocha S <sub>1</sub> obklopena plochou S <sub>2</sub> (S <sub>1</sub> ≠ S <sub>2</sub> )	S <sub>1</sub>	1	$\frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right) - 1}$

Součinitel přenosu tepla zářením vyjadřuje vztah [2]:

$$\alpha_r = \frac{\Phi_r}{S\Delta\theta}, \quad (21)$$

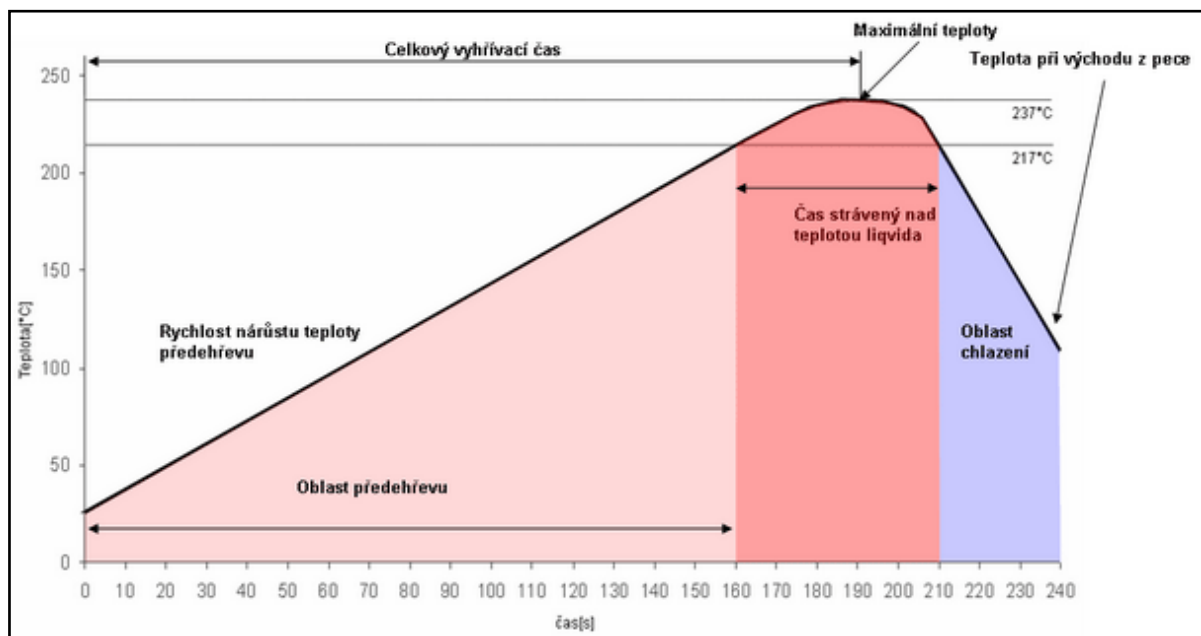
kde  $\Phi_r$  je tepelný tok sdílený zářením,  $S$  je plocha povrchu tělesa a  $\Delta\theta$  je rozdíl teplot povrchu tělesa, ze kterého záření vystupuje, a povrchu tělesa, na které záření dopadá.

### 1.3. Teplotní profily

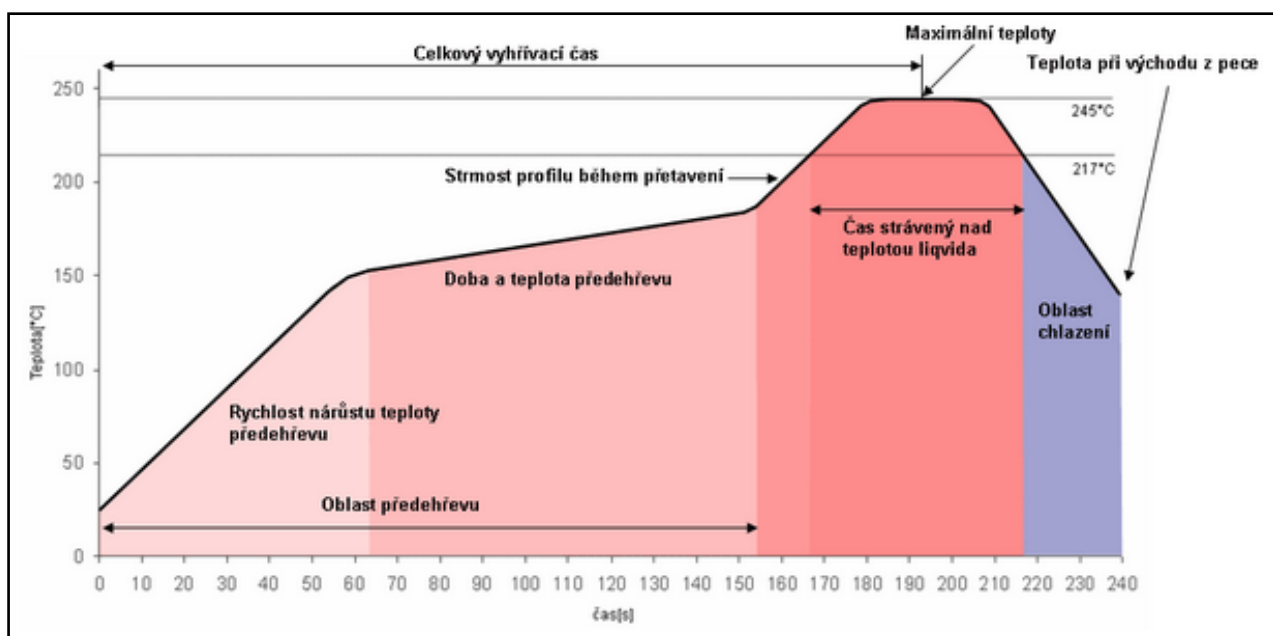
#### 1.3.1. Podélný teplotní profil

Při pájení přetavením je pro kvalitní zapájení součástek velmi důležité dosáhnout optimálního podélného teplotního profilu. Rozlišujeme 2 hlavní typy podélných teplotních profilů – RSS (Ramp Soak Spike) profil a RTS (Ramp to Spike) profil. Profil typu RSS se skládá z několika dílčích částí – předehřev, oblast teplotního vyrovnání, oblast TAL (Time above liquidus) a poslední je proces chlazení. Naproti tomu typ RTS je charakteristický lineárním nárůstem teploty až do vrcholové teploty. Tento typ profilu je výhodnější z toho důvodu, že pájené spoje jsou lesklejší a dochází k menšímu teplotnímu šoku. Dále tavidlový nosič vydrží déle v předehřívacím cyklu, čímž se dosáhne lepší smáčivosti. V současnosti se však ve většině případů oba uvedené typy profilů mezi sebou kombinují. Při lineárním nárůstu teploty se odpaří těkavé složky z tavidla, které se zaktivuje, dojde k předehřátí a minimalizuje se teplotní šok. Implementace RTS profilu

snižuje energetické náklady, zvyšuje účinnost, redukuje pájecí defekty, zlepšuje smáčení i všeobecně zjednodušuje pájecí profil [8].



Obr. 3: Podélný teplotní profil typu RTS [8]



Obr. 4: Podélný teplotní profil typu RSS [8]

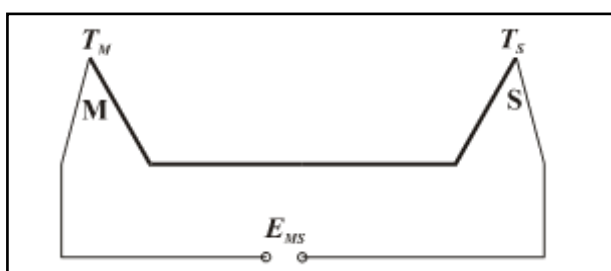
Oba zde uvedené podélné teplotní profily platí pro SAC pájky, neboť uvedená teplota tavení pájky je 217°C.

### 1.3.2. Příčný teplotní profil

Příčný teplotní profil na rozdíl od podélného profilu je ovlivněn zejména konstrukcí přetavovací pece a také hustotou osazení DPS. Příčný teplotní profil znázorňuje nehomogenitu přetavovacího tunelu v příčném směru během pájení přetavením. V současné době dosahují kvalitní přetavovací pece u příčného profilu rozdílu teplot  $\pm 2^\circ\text{C}$  [1].

## 1.4. Termočlánky

Termočlánky jsou zařízení, která se používají ke snímání teploty. Termočlánek se skládá ze dvou různých kovů zapojených do série. Při své činnosti využívají termoelektrického jevu (jev Seebeckův), tzn., mají-li oba spoje dvou rozdílných kovů navzájem různou teplotu, objeví na těchto spojích různé potenciály (napětí) a v důsledku toho začne obvodem procházet elektrický proud.



Obr. 5: Termoelektrický článek

Měřicí spoj na obrázku je označen M, srovnávací spoj je označen S.  $E_{MS}$  [V] je termoelektrické napětí, pro které se používá také název elektromotorické napětí. Je závislé na rozdílu teplot ( $T_M - T_S$ ).  $T_M$  [K] je teplota měřicího spoje,  $T_S$  [K] je teplota srovnávacího spoje. Pro úzký teplotní rozdíl lze poměrně velkou nelinearitu zanedbat.

Při měření napětí je vhodné použít voltmetr s vysokým vnitřním odporem, jinak je v důsledku procházejícího proudu nutné údaj korigovat na odpor voltmetru.

Samostatné termočlánky jsou užívány jako teplotní čidla pro teploty v řádech stovek až tisíců stupňů Celsia. Citlivost se pohybuje v řádech desítek mikrovoltů na °C.

Termočlánky jsou normalizovány, a to včetně písmenného a barevného označení. Příklady termočlánků jsou v následující tabulce.

Tabulka 7: Vybrané termočlánky a jejich vlastnosti

<b>Materiál</b>	<b>Označení</b>	<b>Barva</b>	<b>Maximální teplota</b>
Chromel - konstantan	E	Hnědá	950°C
Železo - konstantan	J	Černá	750°C
Chromel - alumel	K	Žlutá	1250°C
Platinarhodium - platina	R	Zelená	1450°C
Měď - kostantan	T	Oranžová	350°C



Obr. 6: Termočlánky typu K [9]

## 1.5. Analogie mezi tepelným a elektrickým obvodem

Při výpočtech sdílení tepla se dochází často k velmi složitým rovnicím. Proto se využívá analogie tepelných obvodů a elektrickými, díky čemuž si výpočty značně zjednodušíme.

Existuje jistá výrazná analogie mezi polem elektrickým a teplotním. Pole elektrická i teplotní jsou obě nevírová a zřídlová. Pro elektrotechniky je tato analogie užitečná, neboť může podstatně usnadnit výpočty šíření tepla v jednodušších soustavách. Obdobně jako u elektromagnetického pole existuje možnost zavedení elektrických, resp. magnetických obvodů, lze u teplotního pole zavést tepelné obvody. Těchto tepelných obvodů se využívá např. při výpočtech oteplení elektrických strojů apod.

Porovnáme-li rovnice (8), (10) a (20) s Ohmovým zákonem, pro který platí

$$I = \frac{U}{R}, \quad (22)$$

zjistíme, že některé tepelné veličiny odpovídají veličinám elektrickým (viz. Tabulka 8).

Tabulka 8: Elektrické veličiny a odpovídající tepelné veličiny

<b>Elektrická veličina</b>	Napětí, U	Elektrický náboj, $Q_{el}$	Proud, I	Elektrický odpor, $R_{el}$	Elektrická vodivost, $G_{el}$	Elektrická kapacita, $C_{el}$
<b>Jednotka</b>	V	C	A	$\Omega$	S	F
<b>Tepelná veličina</b>	Rozdíl teplot, $\Delta T$	Tepelné množství, $Q_t$	Tepelný tok, $\Phi$	Tepelný odpor, $W_t$	Tepelná vodivost, $G_t$	Tepelná kapacita, $C_t$
<b>Jednotka</b>	K	J	W	K/W	W/K	J/K

Přenos tepla v daném elektrickém zařízení je tedy možné stanovit na základě analogie s elektrickým obvodem, který se skládá z jistého množství impedancí zapojených do série nebo spojených paralelně. K řešení úloh potom postačí běžně známé postupy jako

řešení rovnic např. pomocí Kirchhoffových zákonů [6]. Pro uzel platí I.Kirchhoffův zákon:

$$\sum q = 0 \quad (23)$$

Pro nezávislou složku potom platí:

$$\sum R_t q + \sum \Delta T = 0 \quad (24)$$

## 2. *Praktická část*

### 2.1. *DPS*

V praktické části bylo nejprve nutné vyrobit vhodnou DPS. Vyrobil jsem tedy jednu DPS (tzv. produkční), která simulovala výrobní DPS s SMD pouzdry. Jako základní materiál produkční desky byl použit materiál FR4 tloušťky 1,5mm, přičemž měď byla pouze na horní straně. Tloušťka mědi byla 35 $\mu$ m. Na této desce jsem leptáním vytvořil 4 měděné plošky (2 větší a 2 menší), které sloužily k nalepení vzorku materiálu, který by simuloval použité SMD pouzdro (v našem případě 52pinové PLCC pouzdro). Vzorkem materiálu byl oboustranně plátovaný materiál FR4, přičemž tloušťka FR4 byla 1,5mm a tloušťka mědi byla na obou stranách 18 $\mu$ m. Tento vzorek byl přilepen pouze na jednu menší měděnou plošku, na zbylé tři je možné v budoucnu při navázání na tuto práci přilepit jiné materiály. Použitý vzorek materiálu simulující SMD pouzdro má totožný rozměr jako malá ploška mědi.

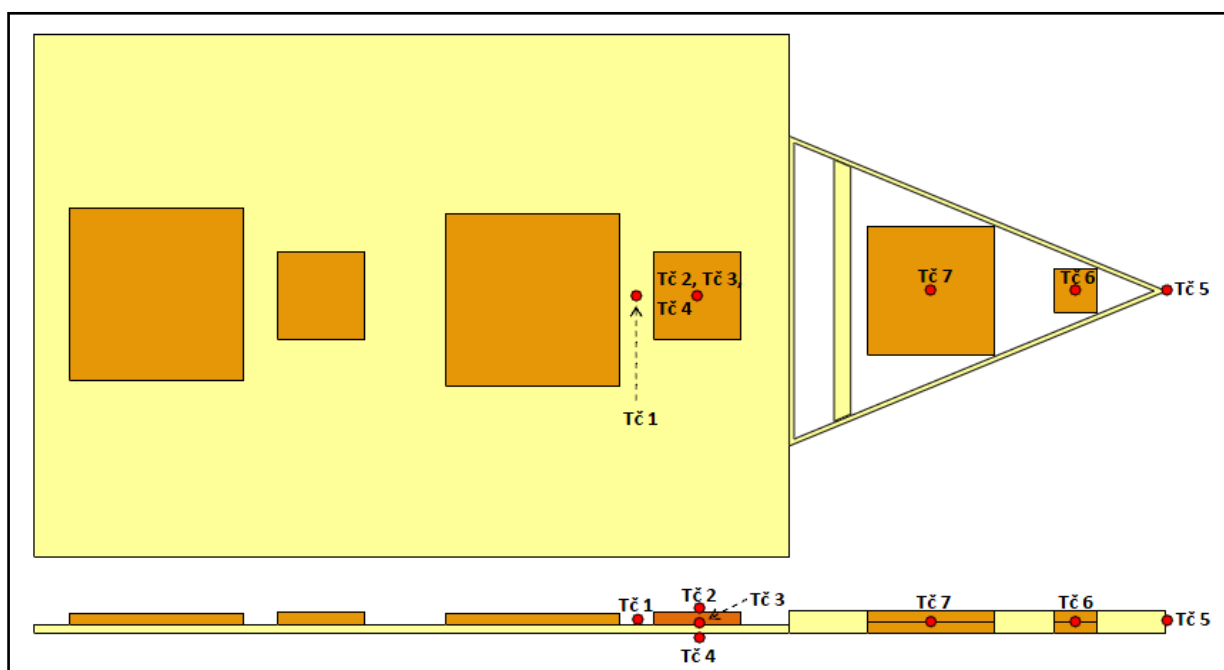
Dále jsem vytvořil druhou desku (tzv. testovací), která byla tvořena materiály s různými tepelnými kapacitami – materiál s velkou tepelnou kapacitou, materiál se střední tepelnou kapacitou a materiál s malou tepelnou kapacitou. Všechny tři materiály simulovaly konkrétní SMD součástku – materiál s velkou tepelnou kapacitou simuloval 84pinové PLCC pouzdro, materiál se střední tepelnou kapacitou simuloval pouzdro QFP 10x10 a materiál s malou tepelnou kapacitou odpovídal SMD rezistoru 1206. Materiál s velkou a střední tepelnou kapacitou byl vytvořen slepením dvou materiálů FR4 čtvercového tvaru epoxidovým lepidlem, z nichž horní materiál FR4 je v obou případech oboustranně plátovaný, kdežto spodní FR4 rovněž v obou případech odleptaný. Termočlánky jsou umístěné mezi materiály FR4, jak je patrné z Obr. 7. Materiál s velkou tepelnou kapacitou se od materiálu se střední tepelnou kapacitou liší pouze ve velikosti plochy FR4 a Cu. Materiál s malou tepelnou kapacitou tvoří pouze malá kapka epoxidového lepidla, ve které je čidlo termočlánku. Termočlánek tedy snímá prakticky teplotu vzduchu. Kapka lepidla je zde z toho důvodu, aby eliminovala případné teplotní

výkyvy způsobené prouděním vzduchu v místnosti. Lepidlo jsem u všech termočlánků při výpočtech zanedbával.

Rozměry desek a jejich částí jsou následující:

- Produkční deska – 17,4cm x 12,0cm
  - Malé plošky – 2,0cm x 2,0cm
  - Velké plošky – 4,0cm x 4,0cm
- Testovací deska – trojúhelníkový tvar o délkách stran 12,5cm; 12,5cm a 8,2cm
  - Materiál s velkou tepelnou kapacitou – 3,0cm x 3,0cm
  - Materiál se střední tepelnou kapacitou – 1,0cm x 1,0cm
  - Materiál s malou tepelnou kapacitou – rozměry zanedbáváme

Ke snímání teplot jsem použil termočlánky typu K a profiloměr se softwarem Slim KIC 2000. K tomuto zařízení je možné připojit až 9 termočlánků, pro mé potřeby jsem si však dostatečně vystačil se 7 termočlánky. Upevnění veškerých termočlánků a lepení materiálů jsem prováděl pomocí epoxidového SMD lepidla Heraeus PD86002 SA. Při měření a simulacích jsem však toto lepidlo zanedbával.



Obr. 7: Umístění termočlánků na desce



Dále bylo nutné vytvořit rámeček, do kterého jsem obě DPS při měřeních upevňoval. Výsledný rámeček vyrobený z hliníku má velkou výhodu v tom, že se dá použít pro jakékoliv DPS o maximální šířce 15cm a maximální délce 34cm. Pro fixaci rámečku při požadovaném rozměru DPS jsou použité ocelové šroubky. Na závěr jsem tento rámeček opatřil tenkou vrstvou lesklého bílého nátěru, který pomůže snížit příjem tepla do rámečku při přenosu sáláním (a tím i ovlivňování teploty na DPS). Nátěr jsem při simulacích a výpočtech opět zanedbával.

Zde jsou uvažované parametry použitých materiálů [2], [6]:

- DPS

- FR4 (epoxid + skelné vlákno)

- $\lambda = 0,2 \text{ W/m K}$
    - $\rho = 1876 \text{ kg/m}^3$
    - $c = 600 \text{ J/kg K}$
    - $\varepsilon = 0,85$
    - $\kappa = 1,78 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

- Cu

- $\lambda = 401 \text{ W/m K}$
    - $\rho = 8933 \text{ kg/m}^3$
    - $c = 385 \text{ J/kg K}$
    - $\varepsilon = 0,85$
    - $\kappa = 1,17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

- Rámeček

- Al

- $\lambda = 220 \text{ W/m K}$
    - $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$
    - $c = 888 \text{ J/kg K}$
    - $\varepsilon = 0,2$

- Ocel

- $\lambda = 17 \text{ W/m K}$
    - $\rho = 8030 \text{ kg/m}^3$
    - $c = 500 \text{ J/kg K}$

- $\varepsilon = 0,08$

Pozn.: Výše uvedené koeficienty emisivity jsem uvažoval pouze v simulační části. Při výrobě DPS a použitých materiálů s různou tepelnou kapacitou jsem používal takové materiály, které měly podobný koeficient emisivity a tento bych nemusel uvažovat (sledovat jeho vliv na naměřené teplotní průběhy) v praktické části.

Pro následné zpracování naměřených hodnot je nutné znát tepelné kapacity použitých materiálů. Při výpočtu těchto tepelných kapacit jsem zanedbával použité epoxidové lepidlo sloužící k přilepení termočlánků a také materiál FR4 tvořící rámeček u testovací desky. K tomuto rámečku byly z vnitřní strany přilepeny lepidlem výše zmíněné materiály s různými tepelnými kapacitami. Při výpočtu tepelné kapacity však nelze uvažovat skutečný rozměr použitého materiálu. Je nutné zjistit maximální vzdálenost od termočlánku, v jaké bude materiálem pohlcené teplo mít vliv na termočlánkem zaznamenané hodnoty teploty. K tomu využijeme vztah pro součinitele teplotní vodivosti (neboli tepelné difuzivity),  $\kappa$ :

$$\kappa = L^2/t \quad (25)$$

kde  $L$  je v našem případě vzdálenost od termočlánku, ve které se teplo pohlcené materiálem bude projevovat na hodnotách zaznamenaných termočlánkem,  $t$  je čas.

Pro  $L_{FR4}$  bude platit:  $L_{FR4} = \sqrt{t * \kappa_{FR4}} = \sqrt{450 * 1,78 * 10^{-7}} = 8,95 * 10^{-3} \text{ m}$ .

Pro  $L_{Cu}$  bude platit:  $L_{Cu} = \sqrt{t * \kappa_{Cu}} = \sqrt{450 * 1,17 * 10^{-4}} = 0,23 \text{ m}$ .

Vzhledem k tomu, že zářiče mají mnohem větší plochu než samotný termočlánek (a jsou umístěné nahoře i dole), bude se tedy teplo daným materiálem k termočlánku šířit ze všech směrů. Tloušťka použitých materiálů je však ve všech případech mnohem menší než spočítané hodnoty  $L_{Cu}$  a  $L_{FR4}$ . Proto budeme spočítané hodnoty  $L_{Cu}$  a  $L_{FR4}$  uvažovat pouze pro délku a šířku použitých materiálů. Plocha, pro kterou budeme hledat tepelnou kapacitu, jež bude mít vliv na termočlánek, tedy bude mít kruhový tvar o poloměru  $L$  se středem v termočlánku. Pozn.: Je-li hodnota skutečný rozměr materiálu menší než  $2L_{Cu}$ , popř.  $2L_{FR4}$ , budeme uvažovat tento skutečný rozměr. Je-li naopak skutečná délka větší, budeme dále uvažovat hodnotu  $L_{Cu}$ , popř.  $L_{FR4}$ .

- Testovací deska
  - Materiál s velkou tepelnou kapacitou
    - $l_{FR4} = 2 * 1,5 * 10^{-3} = 3 * 10^{-3} \text{ m}$
    - $S_{FR4} = \pi l_{FR4}^2 = 3,1415 * (8,95 * 10^{-3})^2 = 2,5165 * 10^{-4} \text{ m}^2$
    - $V_{FR4} = S_{FR4} * l_{FR4} = 2,5165 * 10^{-4} * 3 * 10^{-3} \text{ m}^3 = 7,55 * 10^{-7} \text{ m}^3$
    - $m_{FR4} = \rho_{FR4} * V_{FR4} = 1,876 * 10^6 * 7,55 * 10^{-7} \text{ g} = 1,4163 \text{ g}$
    - $C_{FR4} = m_{FR4} * c_{FR4} = 1,4163 * 0,6 \text{ J/K} = \underline{0,85 \text{ J/K}}$
    - $l_{Cu} = 2 * 18 * 10^{-6} = 3,6 * 10^{-5} \text{ m}$
    - $S_{Cu} = 30 * 10^{-3} * 30 * 10^{-3} \text{ m}^2 = 9 * 10^{-4} \text{ m}^2$
    - $V_{Cu} = S_{Cu} * l_{Cu} = 9 * 10^{-4} * 3,6 * 10^{-5} \text{ m}^3 = 3,24 * 10^{-8} \text{ m}^3$
    - $m_{Cu} = \rho_{Cu} * V_{Cu} = 8,933 * 10^6 * 3,24 * 10^{-8} \text{ g} = 0,2894 \text{ g}$
    - $C_{Cu} = m_{Cu} * c_{Cu} = 0,2894 * 0,385 \text{ J/K} = \underline{0,11 \text{ J/K}}$
    - $C_{celk.} = C_{Cu} + C_{FR4} = 0,11 + 0,85 \text{ J/K} = \underline{0,96 \text{ J/K}}$
  - Materiál se střední tepelnou kapacitou
    - $C_{celk.} = C_{Cu} + C_{FR4} = 0,01 + 0,34 \text{ J/K} = \underline{0,35 \text{ J/K}}$
  - Materiál s malou tepelnou kapacitou
    - Tepelnou kapacitu zanedbáváme =>  $C_{celk.} = \underline{0 \text{ J/K}}$
- Produkční deska
  - Materiál, který má vliv na Tč.3
    - $C_{celk.} = C_{pouz.} + C_{DPS} = 0,48 + 0,47 \text{ J/K} = \underline{0,95 \text{ J/K}}$
  - Materiál, který má vliv na Tč.1
    - $C_{celk.} = C_{FR4} = \underline{0,43 \text{ J/K}}$

Pozn.: Podrobné výpočty tepelných kapacit jsou uvedeny v příloze.

## 2.2. Pec DIMA SMRO 0180

Měření jsem prováděl v přetavovací peci DIMA SMRO 0180. Tato malá průběžná pec je určena spíše k laboratorním účelům. Obsahuje 2 tepelné zóny. První zóna je určena

pro předehřev, přičemž zdrojem tepla je zde infračervený zářič umístěný nad dopravníkem. Druhá zóna je přetavovací a teplo zde zajišťují 2 topné elementy – infračervený zářič nad dopravníkem a nepřímý odporový ohřev pod dopravníkem. Dopravník zde představují tenké pružinky, u kterých je možné nastavit rychlost pohybu, popř. je zcela vypnout.

Velkou nevýhodou této pece je skutečnost, že DPS nikdy nebude ohřívána rovnoměrně shora i zespod, neboť nad a pod dopravníkem je nejen rozdílný počet zářičů, maximální možná nastavovaná teplota zářičů, ale také umístění zářičů, protože spodní zářič je umístěn pod pravým horním zářičem. Fakt, že není možné dosáhnout homogenního prostředí uvnitř pece (viz. Obr. 27), nebo se mu alespoň přiblížit (na rozdíl od moderních vícezónových pecí), výrazně ztížil tuto diplomovou práci. Z tohoto důvodu jsem po dohodě s vedoucím své práce používal při měřeních zpočátku zastavený dopravník, neboť se tím zmenšuje vliv nehomogenního ohřevu DPS.



Obr. 8: Průběžná přetavovací pec DIMA SMRO 0180

## 2.3. Naměřené hodnoty

### 2.3.1. Měření při zastaveném dopravníku

Měření jsem nejdříve prováděl tak, že jsem testovací desku společně s produkční bud'to samostatně, nebo upevněné do rámečku, umístil na střed zastaveného dopravníku a zároveň pod střed horního odklápěcího krytu pece. Nastavil jsem

konkrétní teplotu na všechny zářiče a pozoroval teplotní odezvu, tj. za jak dlouho se daný materiál prohřeje na maximální možnou teplotu.



Obr. 9: Umístění testovací a produkční DPS při měření

Teploty obou horních zářičů i spodního zářiče jsem nastavoval vždy stejné z toho důvodu, aby prostředí uvnitř pece bylo co možná nejvíce homogenní. Konkrétní nastavené teploty zářičů ( $t_{zár.}$ ), při kterých probíhalo měření, jsou v Tabulce 9. Pro každou kombinaci teplot na zářičích jsem měření provedl dvakrát – jednou byly desky upevněné v rámečku, podruhé v rámečku nebyly.

Tabulka 9: Nastavované teploty zářičů

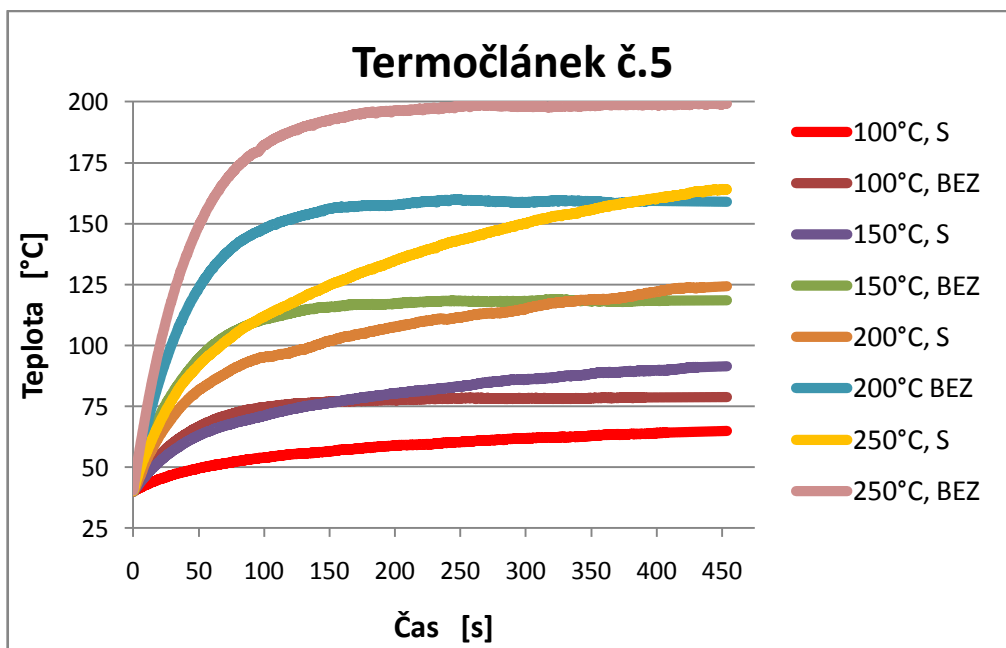
Číslo měření	Teplota horních zářičů [°C]	Teplota spodního zářiče [°C]	Poznámka
1	100	100	S rámečkem
2	100	100	Bez rámečku
3	125	125	S rámečkem
4	125	125	Bez rámečku
5	150	150	S rámečkem
6	150	150	Bez rámečku
7	175	175	S rámečkem
8	175	175	Bez rámečku
9	200	200	S rámečkem
10	200	200	Bez rámečku
11	225	225	S rámečkem
12	225	225	Bez rámečku
13	250	250	S rámečkem
14	250	250	Bez rámečku

## Testovací DPS

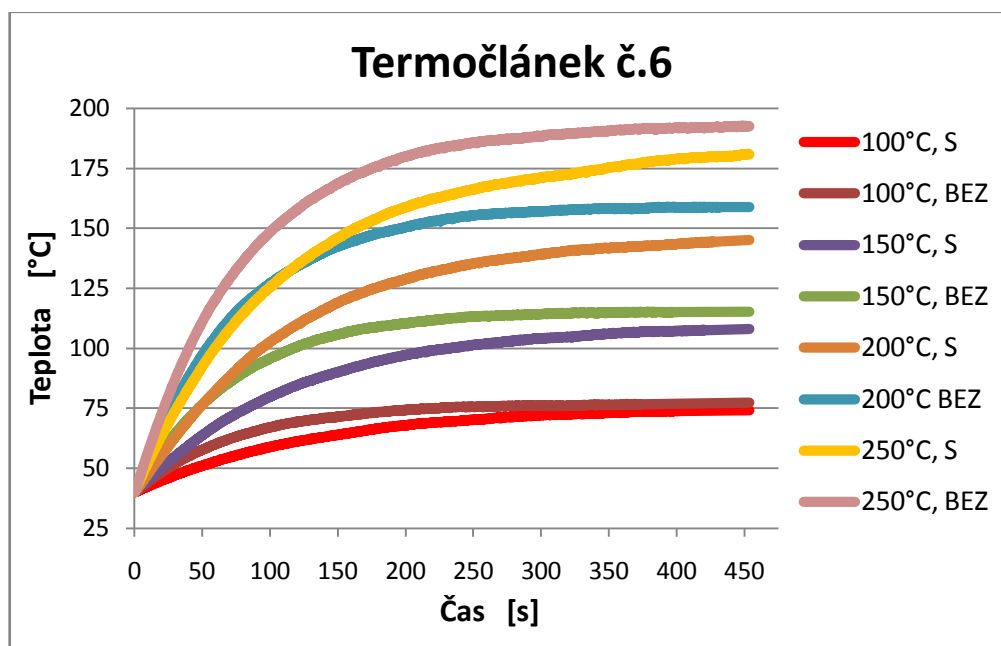
Pro měření byla stěžejní testovací deska, u které jsem porovnával vliv 3 různých tepelných kapacit na naměřenou teplotu. Produkční DPS sloužila spíše pro kontrolu. Grafické závislosti jsem vytvářel pro termočlánky č.3, č.5, č.6 a č.7. V grafech jsou průběhy naměřených teplot pro teploty zářičů 100°C, 150°C, 200°C a 250°C (viz. legenda). Písmena S a BEZ v legendě znamenají, že DPS byly buďto upevněné v rámečku (S) nebo v rámečku nebyly (BEZ).

Při vytváření grafických závislostí jsem stanovil 2 podmínky:

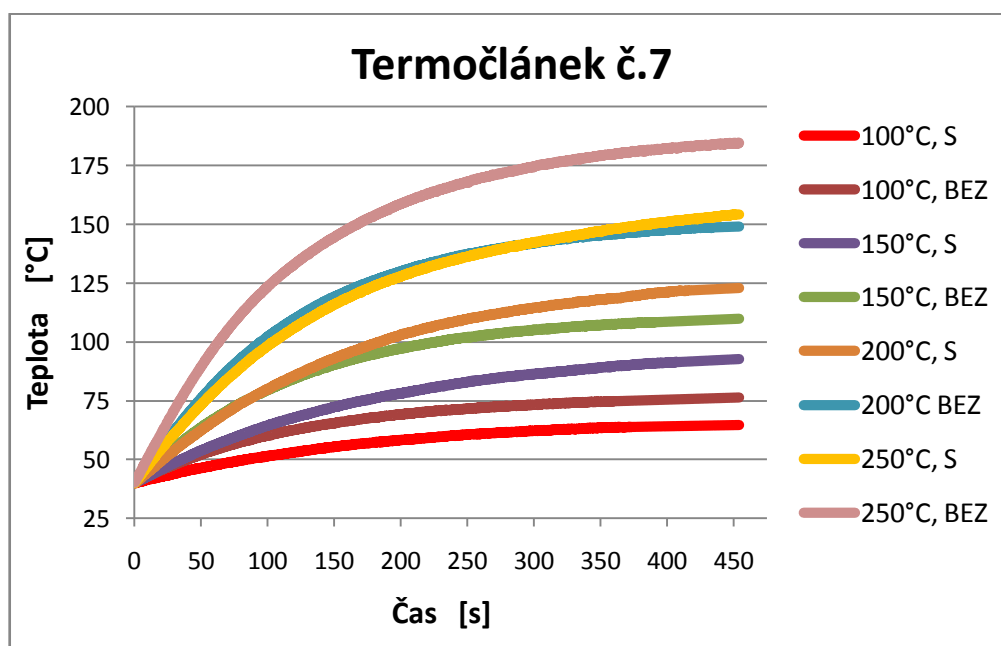
- Počáteční teplota byla 40°C
- Celkový čas, po který byla snímána teplota, byl 450s – při delším intervalu by při opakovaných měřeních docházelo ke znehodnocení DDPS a zkreslení výsledků.



Obr. 10: Naměřené teploty na termočlánek č.5



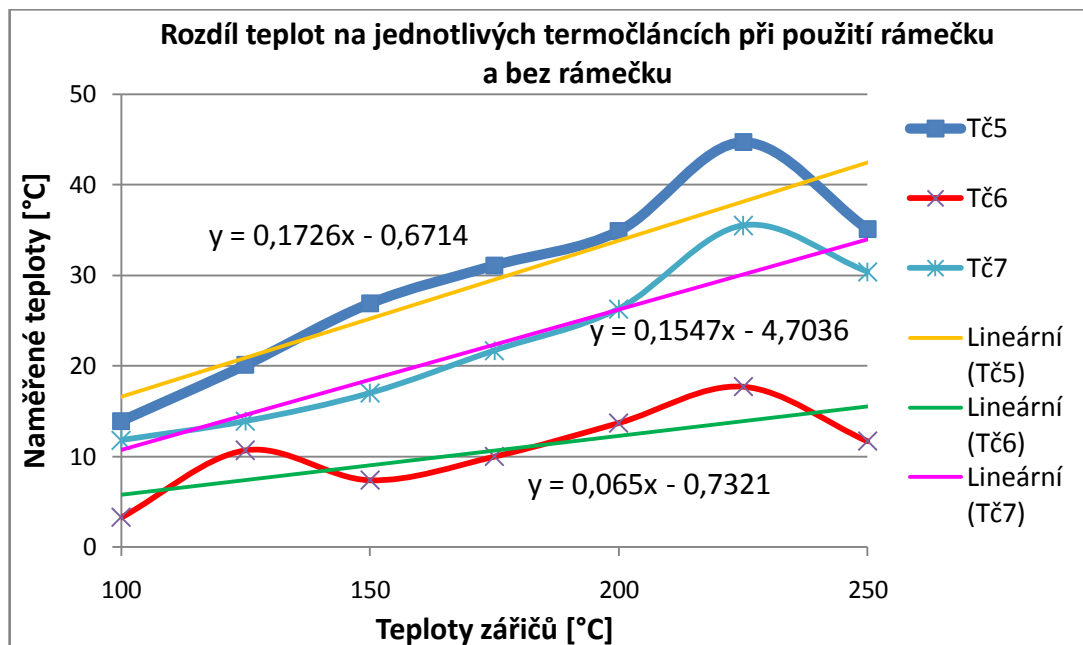
Obr. 11: Naměřené teploty na termočláneku č.6



Obr. 12: Naměřené teploty na termočláneku č.7

Vzhledem k tomu, že se při měřeních zjistilo, že rámeček pohltí značné množství tepla (např. u termočláneku č.5 činí při teplotách zářičů 250°C zjištěný rozdíl teplot při použití rámečku a bez použití rámečku 37°C), bylo vhodné vytvořit určitou korekci, která by

zohlednila, o kolik °C v závislosti na nastavených teplotách zářičů budou teploty na jednotlivých termočláncích nižší při použití rámečku než bez použití rámečku.



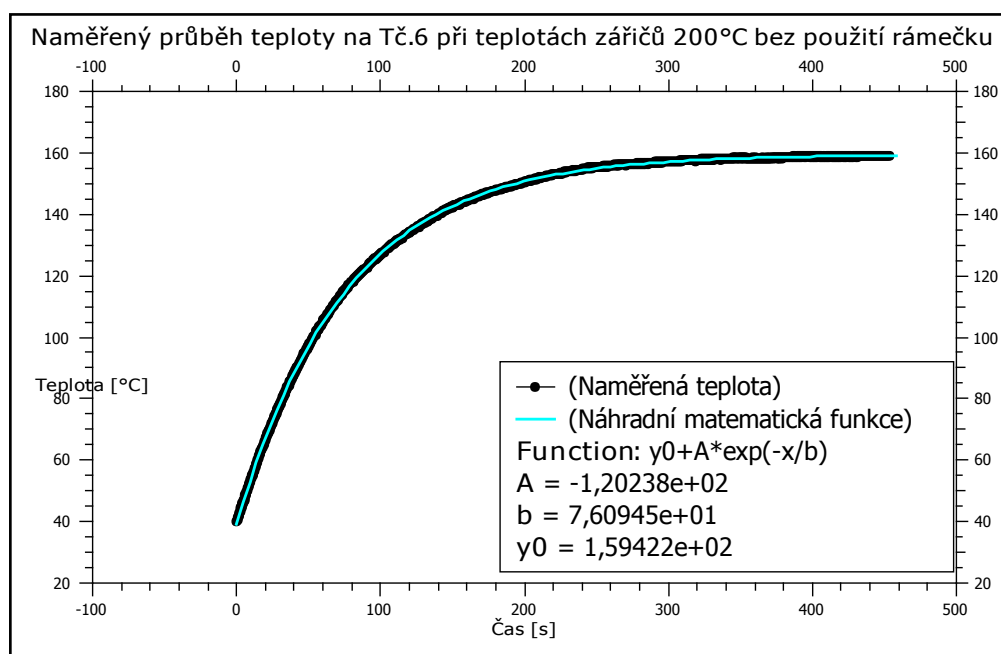
Obr. 13: Rozdíl teplot na jednotlivých termočláncích při použití rámečku a bez rámečku

Jako další krok bylo nutné zjištěné průběhy teplotních odezev (Obr. 10 – Obr. 12) matematicky vyjádřit (pomocí náhradních funkcí), aby bylo možné zjistit závislosti naměřených teplot na tepelných kapacitách použitých materiálů a na teplotách nastavených na zářičích. Jednotlivé průběhy teplotních odezev jsem proto prokládal exponenciální funkcí, která měla obecný tvar:

$$y = y_0 + A * e^{\left(\frac{-x}{b}\right)}, \quad (26)$$

kde  $y$  je naměřená teplota [°C],  $x$  je čas [s] a koeficienty  $y_0$ ,  $A$  a  $b$  jsou hledané koeficienty, do kterých jsem se snažil zohlednit tepelné kapacity použitých materiálů a nastavené teploty na zářičích v peci.





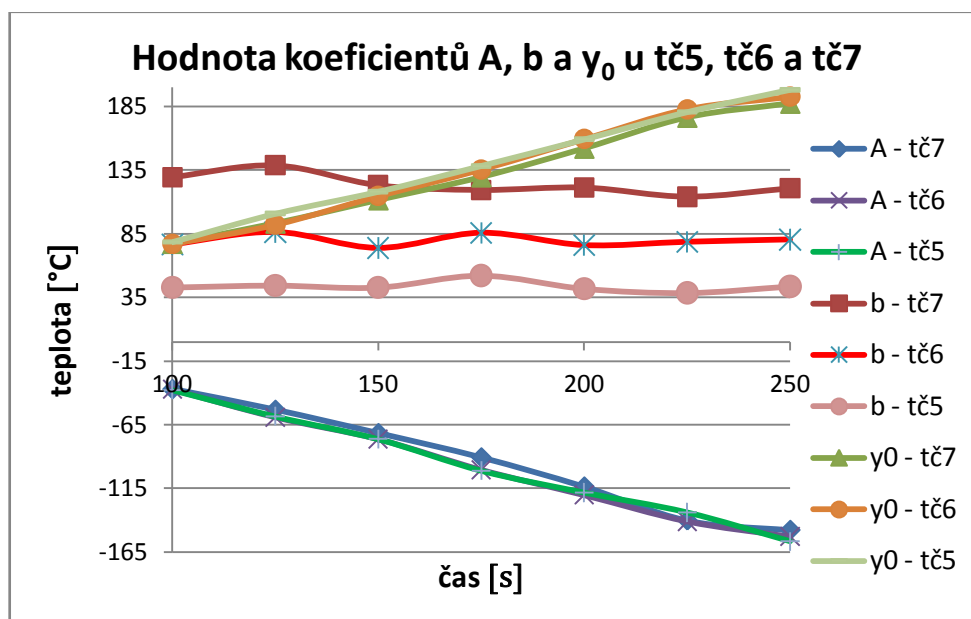
Obr. 14: Příklad náhradní matematické funkce pro Tč.6 při teplotách zářičů 200°C bez použití rámečku

Náhradní matematické funkce jsem takto vyjádřil pro všechna měření s nastavenými teplotami zářičů uvedenými v Tabulce 9 (bez použití rámečku). Zjištěné koeficienty pro jednotlivá měření jsou uvedena v Tabulce 10.

Tabulka 10: Hodnoty koeficientů A, b a  $y_0$  pro Tč.5, Tč.6 a Tč.7 při daných teplotách zářičů

Teplota zářičů [°C]	Tč. 5			Tč. 6			Tč. 7		
	A [-]	b [-]	$y_0$ [-]	A [-]	b [-]	$y_0$ [-]	A [-]	b [-]	$y_0$ [-]
250	-156,6	43,69	198,27	-152,95	80,47	192,69	-147,86	120,71	187,3
225	-133,92	38,59	180,72	-140,91	78,65	182,87	-140,25	114,13	176,27
200	-118,3	41,91	159,25	-120,24	76,09	159,42	-113,67	121,3	151,93
175	-101,1	52,24	138,44	-100,4	85,64	135,54	-90,71	119,45	129,38
150	-76,26	42,86	118,18	-76,29	73,92	114,65	-71,6	123,15	111,35
125	-58,38	44,42	100,86	-59,02	86,25	92,22	-53,22	138,8	93,08
100	-37,56	42,94	78,63	-37,19	76,7	77,11	-36,94	129,56	77,16

Takto zjištěné koeficienty jsem poté vynesl do grafu – viz Obr. 15.



Obr. 15: Hodnoty koeficientů  $A$ ,  $b$  a  $y_0$  u Tč.5, Tč.6 a Tč.7

Z Obr. 15 je patrné, že průběhy hodnot koeficientů  $A$  pro jednotlivé termočlánky jsou téměř lineární, přičemž tyto průběhy téměř splývají. Podobně i průběhy hodnot koeficientů  $y_0$  jsou téměř totožné a téměř lineárně vzrůstají. Pokud jsou tedy průběhy hodnot koeficientů pro jednotlivé termočlánky téměř totožné, je jasné, že na tyto koeficienty nebude mít téměř žádný vliv tepelná kapacita použitých materiálů (každý z termočlánků snímá teplotu u materiálu s rozdílnou tepelnou kapacitou). Vliv tepelné kapacity tedy zanedbáme. U koeficientů  $A$  a  $y_0$  se tedy bude projevovat pouze vliv nastavené teploty na zářičích.

Naproti tomu situace u koeficientu  $b$  je zcela opačná. Z obrázku č. 16 je patrné, že hodnota tohoto koeficientu je pro každý termočlánek téměř konstantní a že na tuto hodnotu téměř nemá vliv teplota zářičů. Naopak hodnoty koeficientu  $b$  u jednotlivých termočlánků jsou různé – z toho je patrné, že se zde projevuje vliv tepelné kapacity použitého materiálu.

Pro zjednodušení jsem tedy provedl následující kroky:

- U koeficientu  $A$  jsem z průběhů hodnot pro jednotlivé termočlánky získal jejich střední hodnotu a tu vynesl do grafu (viz. Obr. 16). Tento průběh jsem dále proložil lineární spojnici trendu a zjistil rovnici regrese, která má tvar:

$$y = -0,7877x + 41,494. \quad (27)$$

kde  $y$  je hledaná hodnota koeficientu a  $x$  je teplota zářičů.

- U koeficientu  $y_0$  jsem provedl totožné operace jako v případě koeficientu  $A$ . Výsledná rovnice regrese má potom tvar:

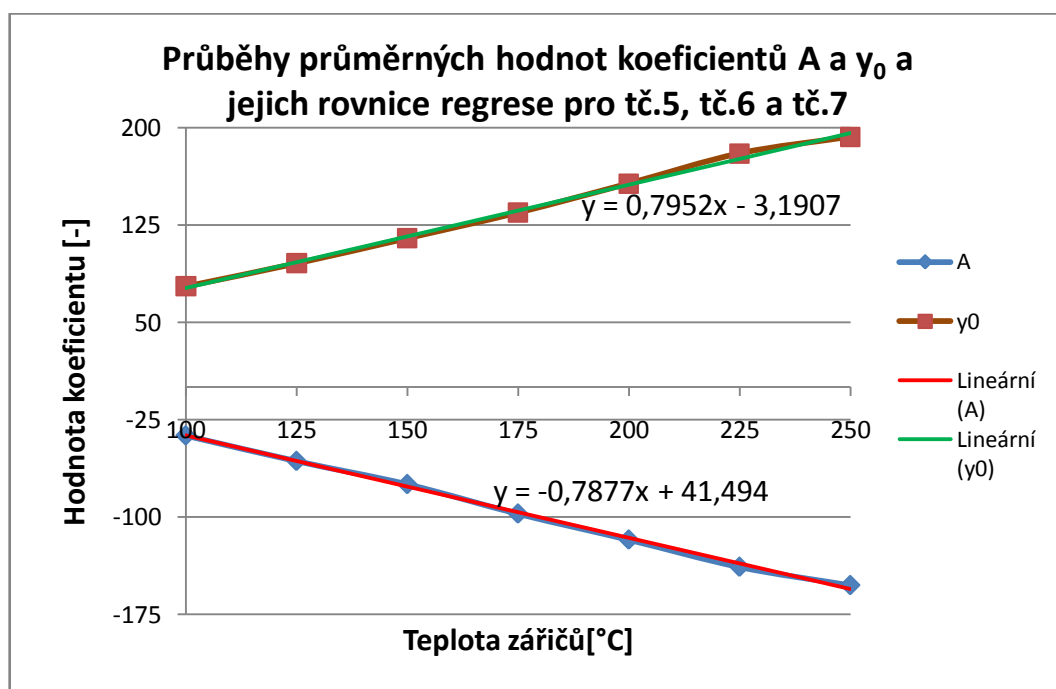
$$y = 0,7952x - 3,1907. \quad (28)$$

kde  $y$  je hledaná hodnota koeficientu a  $x$  je teplota zářičů.

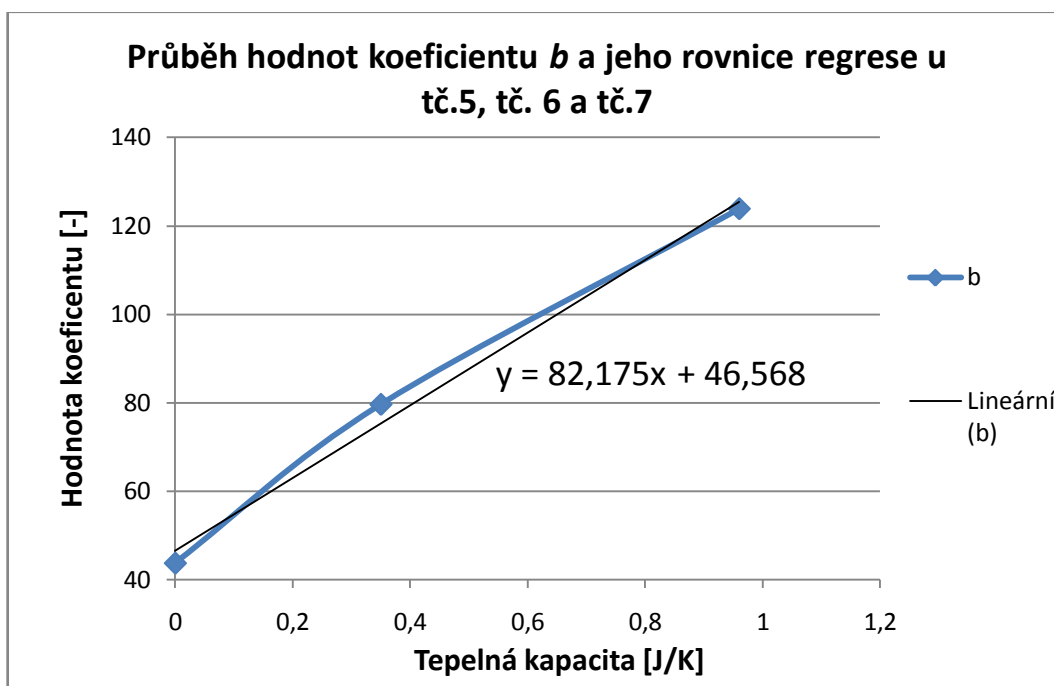
- V případě koeficientu  $b$  byl nutný mírně odlišný postup. Zde jsem pro jednotlivé termočlánky spočítal střední hodnotu koeficientu  $b$ . Získal jsem tedy tři hodnoty koeficientu pro tři termočlánky. Tyto hodnoty jsem opět vynesl do grafu (viz. Obr. 17) a opět proložil lineární spojnicí trendu. Výsledná rovnice regrese má tvar:

$$y = 82,175x + 46,568. \quad (29)$$

kde  $y$  je hledaná hodnota koeficientu a  $x$  je tepelná kapacita materiálu.



Obr. 16: Průběhy průměrných hodnot koeficientů  $A$  a  $y_0$  a jejich rovnice regrese pro Tč.5, Tč.6 a Tč.7



Obr. 17: Průběh hodnot koeficientu  $b$  a jeho rovnice regrese u Tč.5, Tč.6 a Tč.7

Nyní už jsme schopni pro testovací desku předpovědět teplotu na jednotlivých termočláncích. Celkový postup uvedu na následujícím příkladě:

- Nastavené teploty zářičů – 175°C, snímaná teplota na Tč.6 v čase 250s
  - Nejprve je nutné spočítat koeficienty  $A$ ,  $b$  a  $y_0$ . Teplotu zářičů, tepelnou kapacitu materiálu s Tč.6 a zadaný čas dosadíme do rovnic (27) až (29) a pro hledané koeficienty dostaneme:

$$\text{Kof. } A = -0,7877 * 175 + 41,494 = -96,3535$$

$$\text{Kof. } b = 82,175 * 0,35 + 46,568 = 75,3293$$

$$\text{Kof. } y_0 = 0,7952 * 175 - 3,1907 = 135,9693$$

- Dále tyto koeficienty dosadíme do rovnice (26) a dostaneme hledanou teplotu:

$$y = y_0 + A * e^{\left(\frac{-x}{b}\right)} = 135,9693 - 96,3535 * e^{\left(\frac{-250}{75,3293}\right)} = \underline{\underline{132,5^\circ\text{C}}}$$

Naměřená teplota byla 131,0°C (DPS nebyla umístěna v rámečku), takže predikovaná teplota se od naměřené liší o pouhých 1,5°C. Tento rozdíl je dán zřejmě několika faktory:

- Zanedbáváním epoxidového lepidla při výpočtech

- Zprůměrováním a následným proložením spojnicí trendu hodnot koeficientů  $A$  a  $y_0$
- Nehomogenním prostředím uvnitř pece – i když se může zdát, že termočlánky nejsou daleko od sebe, tudíž by vliv nehomogenního prostředí měl být zanedbatelný, není tomu tak. Jak je patrné z Obr. 27, vlivem mezery mezi horními zářiči dochází ke snížení teploty v této části pece, což se projeví i na naměřených teplotách.
- Patrně největší vliv však na tento rozdíl bude mít nepřesné určení rovnice vedoucí ke koeficientu  $b$ . Pro přesnější určení koeficientu  $b$  by bylo potřeba změřit teploty u dalších materiálů s různou tepelnou kapacitou, čehož však díky náročnosti této problematiky nebylo dosaženo.

Výše uvedený postup predikování teplot na termočláncích u testovací desky jsem zpracoval do jednoduchého programu v excelu, do kterého stačí zadat teplotu zářičů, tepelnou kapacitu materiálu a sledovaný čas a automaticky se zobrazí nejenom hodnota koeficientů, ale hlavně také předpovídaná teplota. Program je uložen na příloženém CD.

Pro názornou ukázkou přesnosti předpovídání teplot na testovací desce přikládám přehled několika náhodně vybraných kombinací teplota zářičů – tepelná kapacita materiálu – čas a jím odpovídající změřená teplota ( $t_z$ ), predikovaná teplota ( $t_p$ ) a rozdíl teplot.

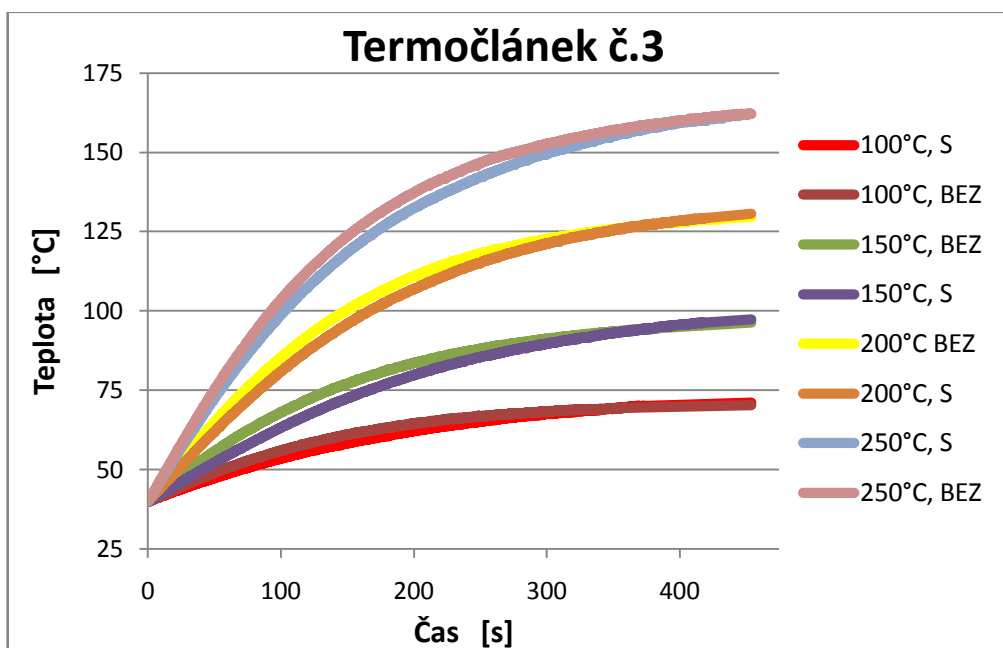
Tabulka 11: Příklady naměřených a předpovídaných teplot pro testovací desku

		Teploty na Tč.5 $C = 0 \text{ J/K}$			Teploty na Tč.6 $C = 0,35 \text{ J/K}$			Teploty na Tč.7 $C = 0,96 \text{ J/K}$		
		$t_z$	$t_p$	Rozdíl	$t_z$	$t_p$	Rozdíl	$t_z$	$t_p$	Rozdíl
$t_{zár.} [^{\circ}\text{C}]$	<b>100</b>	78,2	76,3	<b>1,9</b>	76,1	75,8	<b>0,3</b>	73,7	73,3	<b>0,4</b>
$t [s]$	<b>315</b>									
$t_{zár.} [^{\circ}\text{C}]$	<b>150</b>	118,0	115,5	<b>2,5</b>	112,6	112,5	<b>0,1</b>	100,2	103,8	<b>-3,6</b>
$t [s]$	<b>230</b>									
$t_{zár.} [^{\circ}\text{C}]$	<b>200</b>	159,4	155,8	<b>3,6</b>	158,7	155,3	<b>3,4</b>	147,8	151,1	<b>-3,3</b>
$t [s]$	<b>400</b>									
$t_{zár.} [^{\circ}\text{C}]$	<b>250</b>	182,2	177,5	<b>4,7</b>	149,6	154,4	<b>-4,8</b>	123,6	125,6	<b>-2,0</b>
$t [s]$	<b>100</b>									

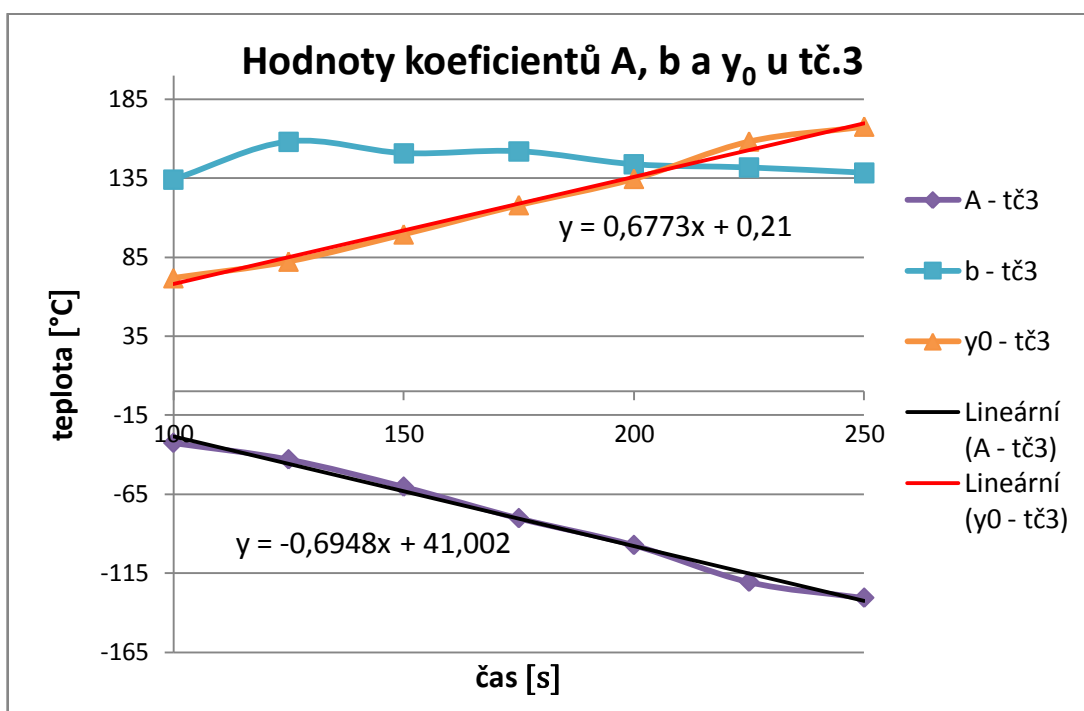
Takto zjištěné teploty jsou na testovací desce, která není upevněná v rámečku. Pokud bychom chtěli zjistit teplotu na testovací desce, která je v rámečku, museli bychom dosadit teplotu zářičů do rovnice pro konkrétní termočlánek (viz. Obr. 13) a takto zjištěnou teplotu bychom odečetli od spočítané teploty na testovací desce, která není v rámečku.

### ***Produkční DPS***

Výsledky a znalosti získané na testovací desce jsem poté aplikoval i na desku produkční. Cílem byla opět snaha o predikci teplot naměřených na produkční desce. Postupoval jsem totožně jako u testovací desky – nejprve jsem jednotlivé naměřené teplotní průběhy proložil funkcí (26). Poté jsem do grafu vynesl hodnoty koeficientů  $A$  a  $y_0$  v závislosti na teplotách zářičů a jejich průběhy jsem proložil lineární spojnicí trendu – viz. Obr. 19. Z hodnot koeficientů  $b$  jsem rovněž spočítal střední hodnotu. Vzhledem k Obr. 27 však nelze v jednom grafu vynášet hodnoty pro testovací desky společně s hodnotami pro desku produkční, neboť při stejných teplotách zářičů je v okolí testovací a produkční desky zcela rozdílné rozložení teplot. Z tohoto důvodu by při sloučení hodnot z testovací desky s hodnotami z produkční desky došlo k chybě při výpočtu koeficientů  $A$  a  $y_0$  určení a jejich závislosti na nastavených teplotách zářičů. Proto jsem hodnoty koeficientů  $A$  a  $y_0$  pro produkční desku vyhodnocoval samostatně. Z hodnot koeficientů  $b$  jsem opět spočítal střední hodnotu, nicméně problémem absence dalšího materiálu s jinou tepelnou kapacitou, u kterého by byla snímána teplota, jsem vyřešil tak, že funkci z Obr. 17 jsem posunul do nově získaného bodu koeficientu  $b$  pro produkční desku ( $b = 145,46$ ), takže jsem získal novou rovnici pro výpočet koeficientu  $b$ .



Obr. 18: Naměřené teploty na termočlánu č.3



Obr. 19: Hodnoty koeficientů A, b a  $\gamma_0$  u Tč.3

Zjištěné rovnice pro jednotlivé koeficienty mají potom tvar:

- Koeficient A:

$$y = -0,6948x + 41,002, \quad (30)$$

kde  $y$  je hledaná hodnota koeficientu a  $x$  je teplota zářičů.

- Koeficient b:

$$y = 82,175 + 67,394x, \quad (31)$$

kde  $y$  je hledaná hodnota koeficientu a  $x$  je tepelná kapacita materiálu.

- Koeficient  $y_0$ :

$$y = 0,6773x + 0,21, \quad (32)$$

kde  $y$  je hledaná hodnota koeficientu a  $x$  je teplota zářičů.

Nyní opět uvedeme příklad výpočtu teploty na Tč.3, aniž by byla produkční deska upevněná v rámečku:

- Nastavené teploty zářičů – 175°C, snímaná teplota na Tč.3 v čase 200s
  - Opět nejprve spočítáme koeficienty  $A$ ,  $b$  a  $y_0$ . Teplotu zářičů, tepelnou kapacitu materiálu s Tč.3 a zadaný čas dosadíme do rovnic (30) až (32) a pro hledané koeficienty dostaneme:

$$\text{Kof. } A = -0,6948 * 175 + 41,002 = -80,588$$

$$\text{Kof. } b = 82,175 * 0,96 + 67,394 = 145,46$$

$$\text{Kof. } y_0 = 0,6773 * 175 + 0,21 = 118,7375$$

- Dále tyto koeficienty dosadíme do rovnice (26) a dostaneme hledanou teplotu:

$$y = y_0 + A * e^{\left(\frac{-x}{b}\right)} = 118,7375 - 80,588 * e^{\left(\frac{-200}{145,46}\right)} = \underline{98,4^\circ\text{C}}$$

Naměřená teplota byla 96,7°C, takže predikovaná teplota se od naměřené liší o velmi přijatelných 1,7°C. Celkově mírně přesnější predikování teplot na Tč.3 je dáno patrně tím, že na rozdíl od testovací desky zde nedošlo k průměrování hodnot koeficientů u více termočlánků. Tím, že jsme vyhodnocovali průběhy hodnot koeficientů pouze pro jediný termočlánek, došlo k lepšímu určení rovnice spojnice trendu a tedy i k přesnějšímu určení hledané teploty. Pokud bychom vyhodnocovali hodnoty z více termočlánků na produkční desce, potom by patrně došlo k malé nepřesnosti při průměrování hodnot



odpovídajících si koeficientů, ale tato odchylka by nebyla nijak závratná. Celkově vzato, predikování teplot s výslednou odchylkou do 5°C od skutečně naměřených hodnot lze považovat za úspěšné. Navíc při použití podobné přetavovací pece, která vytvoření homogenního prostředí uvnitř pece velmi ztěžuje.

Tabulka 12: Příklady naměřených a předpovídaných teplot pro testovací desku

		<b>Teploty na Tč.3</b>		
		<b>C = 0,95 J/K</b>		
		<b>t<sub>z</sub></b>	<b>t<sub>p</sub></b>	<b>Rozdíl</b>
<b>t<sub>zář.</sub> [°C]</b>	<b>100</b>	68,7	64,7	<b>4,0</b>
<b>t [s]</b>	<b>315</b>			
<b>t<sub>zář.</sub> [°C]</b>	<b>150</b>	86,5	88,8	<b>-2,3</b>
<b>t [s]</b>	<b>230</b>			
<b>t<sub>zář.</sub> [°C]</b>	<b>200</b>	128,2	129,4	<b>-1,2</b>
<b>t [s]</b>	<b>400</b>			
<b>t<sub>zář.</sub> [°C]</b>	<b>250</b>	103,6	102,8	<b>0,8</b>
<b>t [s]</b>	<b>100</b>			

Rozdíl teplot na Tč.3 při použití rámečku a bez použití rámečku je oproti testovací desce minimální. Jak je patrné z Obrázku 19, tak maximální rozdíl těchto teplot je 5°C.

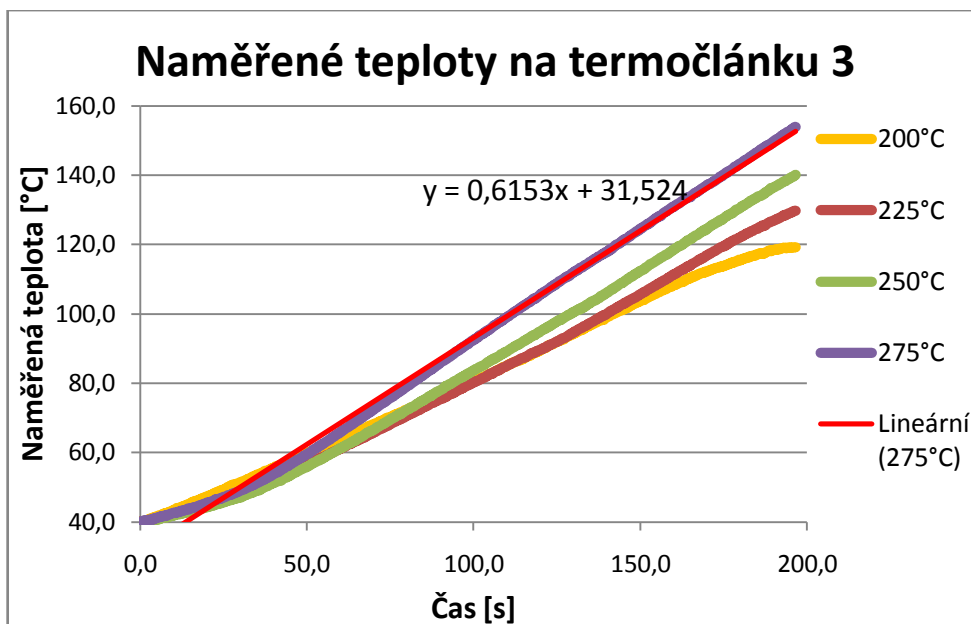
## 2.3.2. *Měření při zapnutém dopravníku*

### 2.3.2.1. *Metoda náhradní matematické funkce*

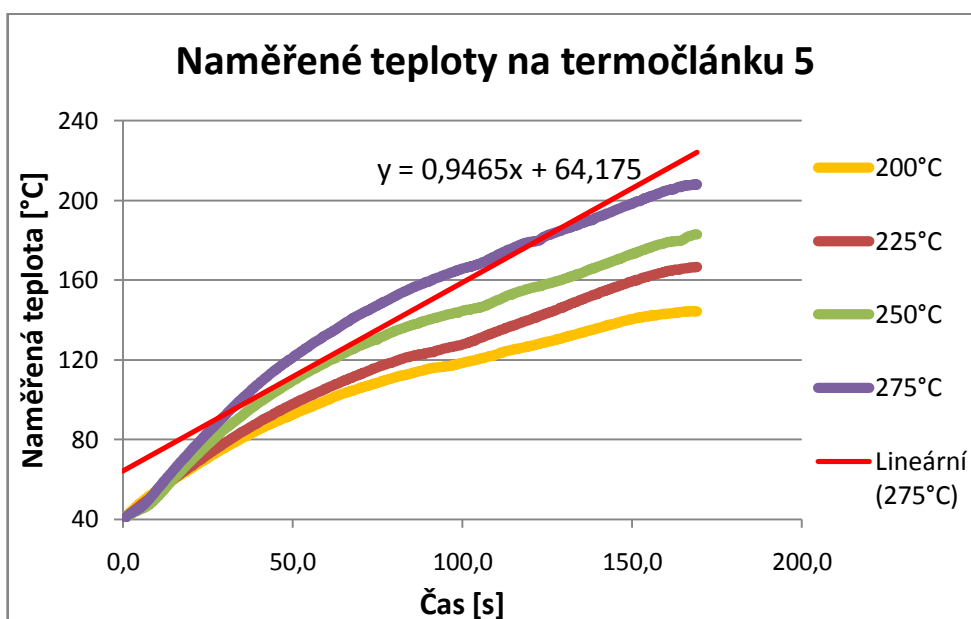
Ve druhé části jsem se poznatky získané analýzou hodnot naměřených při zastaveném dopravníku snažil použít pro predikování teplot na DPS při průchodu pecí, tj. při zapnutém dopravníku. Měření jsem tentokrát prováděl pro teploty zářičů 200°C, 225°C, 250°C a 275°C. Rychlost dopravníku jsem na peci nastavil na 10 jednotek, což odpovídá skutečné rychlosti  $2,42 \cdot 10^{-3}$  m/s.

Naměřené teploty jsem opět vynesl do grafů, přičemž při vyhodnocování průběhů naměřených teplot jsem opět stanovil 2 omezující podmínky:

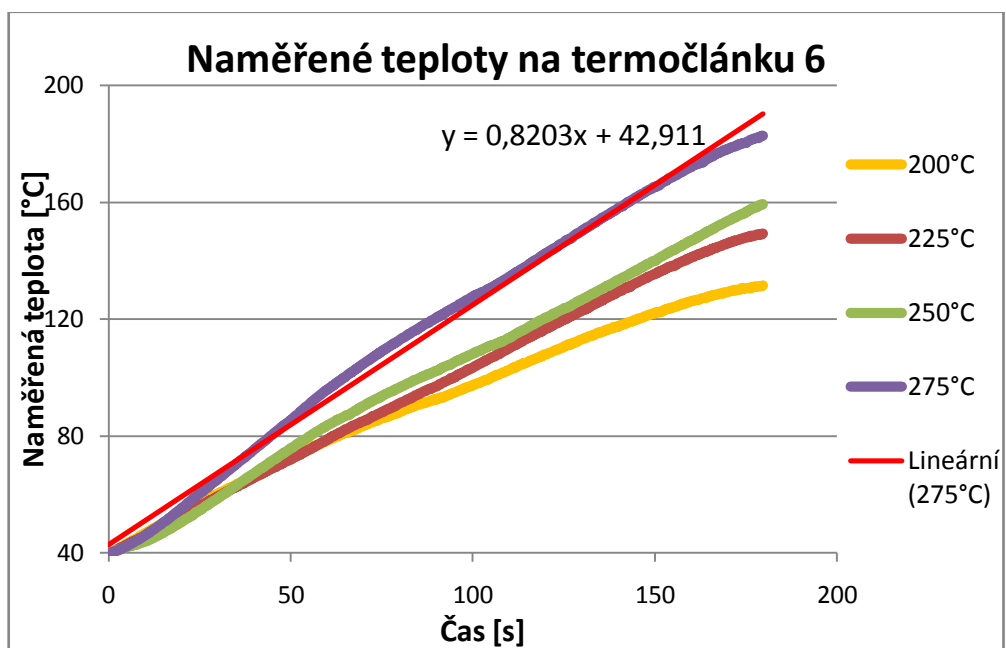
- Počáteční teplota byla opět 40°C
- Doba, po kterou jsem vyhodnocoval naměřené hodnoty, byla dána okamžikem, kdy první teplotní průběh v daném grafu dosáhl své maximální hodnoty (ve všech případech to byl průběh teplot při nastavených 200°C na zářičích). Nezajímal nás tedy proces chlazení DPS, nýbrž pouze teplotní nárůst.



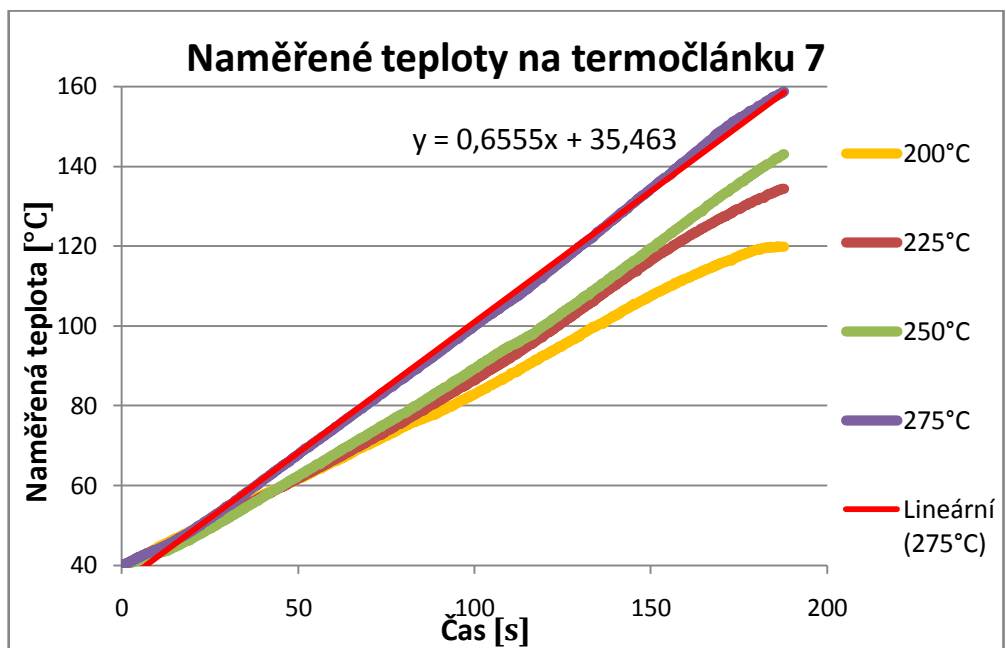
Obr. 20: Naměřené teploty na Tč.3 a rovnice regrese pro 275°C



Obr. 21: Naměřené teploty na Tč.5 a rovnice regrese pro 275°C



Obr. 22: Naměřené teploty na Tč.6 a rovnice regrese pro 275°C



Obr. 23: Naměřené teploty na Tč.7 a rovnice regrese pro 275°C

Jak je patrné z Obr. 20 – Obr. 23, teplotní průběhy bylo opět nutné proložit jistou matematickou náhradní funkcí, do jejíchž koeficientů bychom zahrnuli tepelnou

kapacitu materiálů a teploty nastavené na zářičích. Na rozdíl od měření při zastaveném dopravníku nebylo tentokrát vhodné teplotní průběhy prokládat exponenciální funkcí, neboť již při malém odchýlení od trendu nárůstu teploty docházelo ke změně hodnot koeficientů. Tyto změny se pohybovaly v řádech statisíců. Jako lepší se proto jevila volba lineární funkce v obecném tvaru

$$y = A * x + b \quad (33)$$

kde  $y$  je naměřená teplota,  $x$  je čas, ve kterém byla daná teplota zaznamenána, a  $A$  a  $b$  jsou hledané koeficienty. Hodnoty těchto koeficientů pro Tč.3, Tč.5, Tč.6 a Tč.7 při všech teplotách zářičů jsou v následující tabulce:

Tabulka 13: Hodnoty koeficientů  $A$  a  $b$  pro jednotlivé termočlánky

	Tč.3		Tč.5		Tč.6		Tč.7	
Teploty zářičů	A	b	A	b	A	b	A	b
200°C	0,4266	38,626	0,5662	58,753	0,5121	45,33	0,444	39,618
225°C	0,4786	33,813	0,7014	56,573	0,6264	40,787	0,5233	36,266
250°C	0,5389	31,276	0,7871	61,064	0,6711	40,271	0,5627	34,666
275°C	0,6153	31,524	0,9465	64,175	0,8203	42,911	0,6555	35,463

Takto získané hodnoty koeficientů jsem opět vynesl do grafu tak, abych získal rovnice pro jejich výpočet (viz. Obr. 24 a Obr. 25).

Vzhledem k tomu, že koeficient  $A$  je řádově 100krát menší než koeficient  $b$ , sečetl jsem opět hodnoty koeficientu  $A$  pro jednotlivé termočlánky při odpovídajících si teplotách zářičů a vynesl jsem do grafu průběh jejich průměrné hodnoty. Výsledná rovnice pro výpočet koeficientu  $A$  má potom tvar

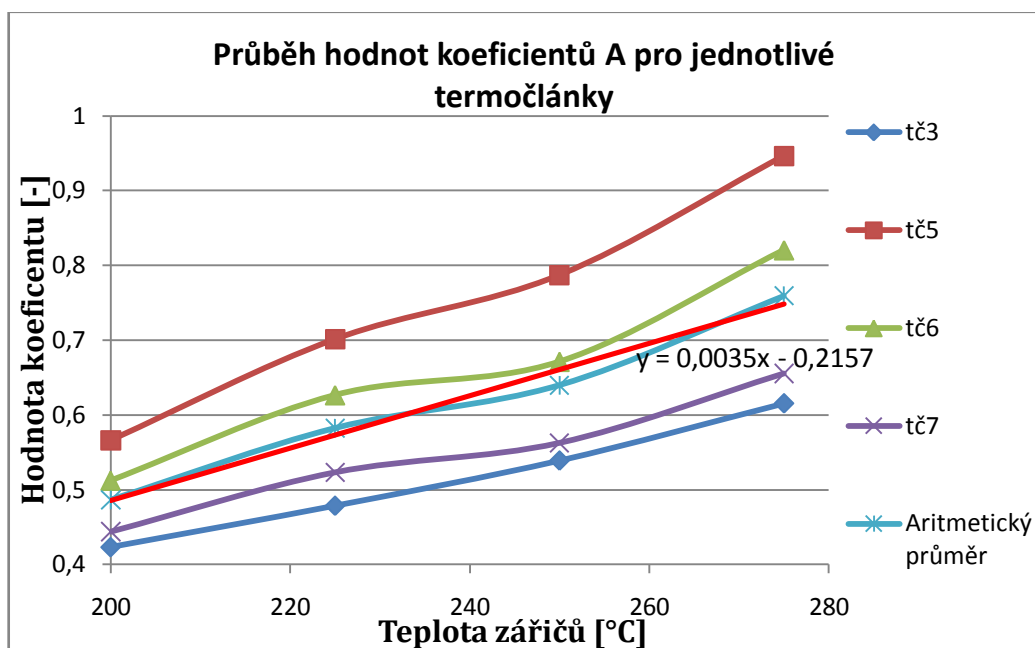
$$y = 0,0035 * x - 0,2157 \quad (34)$$

kde za  $x$  dosazujeme teplotu zářičů.

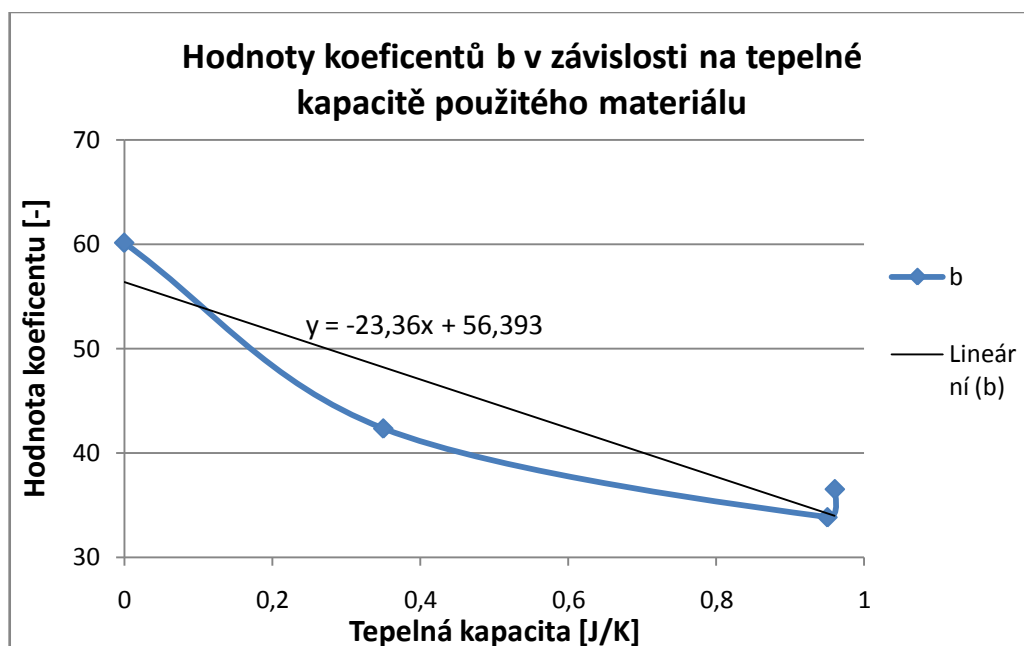
V případě koeficientu  $b$  jsem spočítal střední hodnotu tohoto koeficientu pro každý termočlánek a následně vynesl do grafu v závislosti na tepelné kapacitě. Výsledná rovnice pro výpočet koeficientu  $b$  má potom tvar

$$y = -23,36 * x + 56,393 \quad (35)$$

kde za  $x$  dosazujeme tepelnou kapacitu materiálu.



Obr. 24: Průběh hodnot koeficientu A pro jednotlivé termočláanky



Obr. 25: Hodnoty koeficientů b v závislosti na tepelné kapacitě

V následující tabulce je uveden přehled naměřených a předpovídaných teplot pro náhodně zvolené teploty zářičů a čas, ve kterém tato teplota byla zaznamenána.

Tabulka 14: Příklady naměřených a předpovídaných teplot pro Tč.3

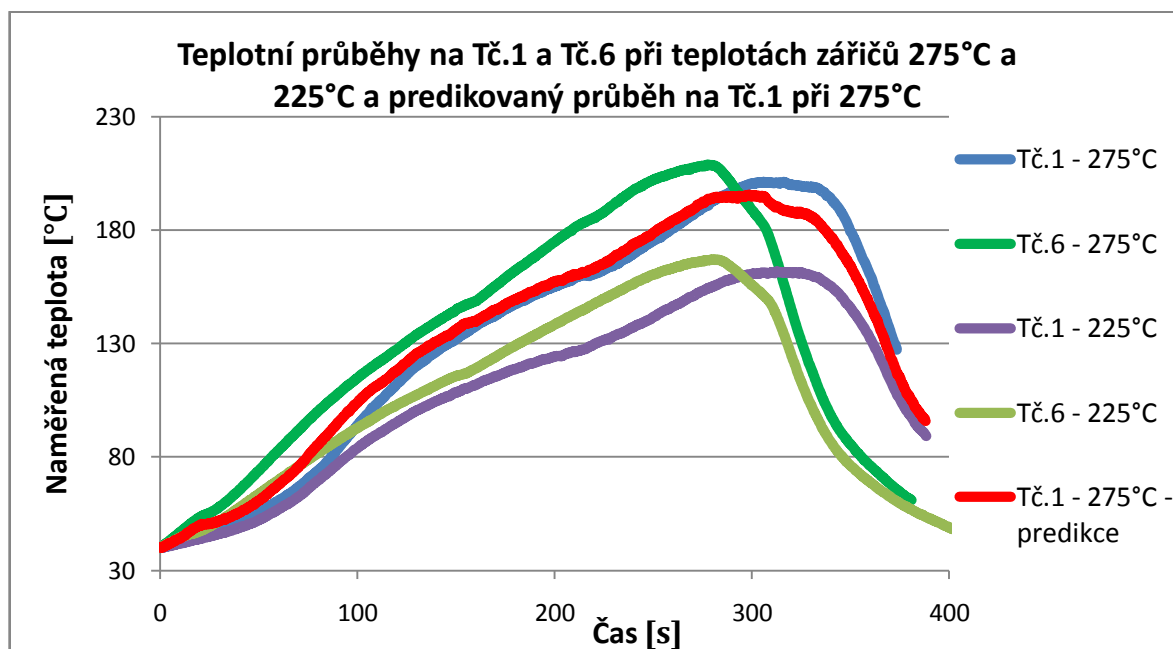
		Teploty na Tč.3 C = 0,95 J/K		
		$t_z$	$t_p$	Rozdíl
$t_{z\acute{a}\acute{r}. [^{\circ}\text{C}]$	<b>200</b>	70,1	70,5	<b>-0,4</b>
$t [s]$	<b>75</b>			
$t_{z\acute{a}\acute{r}. [^{\circ}\text{C}]$	<b>225</b>	94,6	108,5	<b>-13,9</b>
$t [s]$	<b>130</b>			
$t_{z\acute{a}\acute{r}. [^{\circ}\text{C}]$	<b>250</b>	118,5	139,7	<b>-21,2</b>
$t [s]$	<b>160</b>			
$t_{z\acute{a}\acute{r}. [^{\circ}\text{C}]$	<b>275</b>	149,7	172,4	<b>-22,7</b>
$t [s]$	<b>185</b>			

Z tabulky 14 je patrné, že rozdíl mezi naměřenými a predikovanými teplotami je již značný. Z části to lze připisovat nepřesnostím při vytváření rovnic pro výpočet koeficientů  $A$  a  $b$ . Z Obr. 21 je dále patrné, že teplotní průběh zaznamenaný na Tč.5 se od lineárního průběhu liší a velmi vzdáleně připomíná spíše teplotní odezvu např. z Obr. 10. Velký vliv na tento markantní rozdíl mezi naměřenou a predikovanou teplotou však bude mít zcela jistě konstrukce použité pece a fakt, že lze jen velmi obtížně dosáhnout homogenního prostředí.

### 2.3.2.2. Metoda podobnosti tepelných kapacit

Vzhledem k neuspokojivé úspěšnosti při predikci teplot výše uvedeným způsobem jsem se po zvážení všech faktů a okolností rozhodl pro jednodušší postup. Ve své úvaze jsem vycházel z Obr. 26. Z obrázku je patrné, že při dané teplotě zářičů je na termočláncích snímajících teplotu materiálů o srovnatelné tepelné kapacitě (0,35J/K a 0,43J/K) naměřena srovnatelná vrcholová teplota. Časový rozdíl mezi okamžiky, ve kterých tyto termočlánky zaznamenají maximální teplotu, je dán tepelnou kapacitou materiálu, resp. rozdílem tepelné kapacity obou materiálů. Naopak při porovnání průběhů teplot na stejném termočlánku při různých teplotách zářičů je patrné, že na hodnotu maximální teploty má vliv zejména teplota zářičů. Po uvědomění si těchto faktů

jsme potom schopni předpovědět teplotu součástky na produkční desce známe-li teplotní průběhy součástek s rozdílnými tepelnými kapacitami na testovací DPS.



Obr. 26: Teplotní průběhy na Tč.1 a Tč.6 při teplotách zářičů 225°C a 275°C a rychlosti dopravníku 10,93cm/min.

Postup při predikci teplotního průběhu, kdy naším cílem je dosažení teplotního profilu doporučeného od výrobce konkrétní pájecí pasty: Po výpočtu orientační rychlosti dopravníku z délky aktivních topných zón pece a doby přetahovacího cyklu doporučeného výrobcem nastavíme teplotu zářičů dle zkušeností a projedeme přetavovací pec testovací deskou společně s produkční DPS, na nichž máme 2 nebo více součástek o rozdílné tepelné kapacitě u kterých snímáme teplotu. Poté porovnáme zjištěné teplotní průběhy u testovací desky s doporučeným teplotním profilem přetavovací pasty dodaným výrobcem (příklad takového profilu – viz Příloha 8) a změníme teplotu zářičů tak, abychom se doporučenému profilu přiblížili, a celý proces opakujeme (tentokrát však již pouze s testovací deskou). Poté porovnáme teplotní průběhy změřené na konkrétní součástce na testovací desce při 2 různých teplotách zářičů ( $\frac{\vartheta_{T_1}}{\vartheta_{T_2}} * \vartheta_{P_2} = \vartheta_{P_1}$ , kde  $\vartheta_{T_1}$  je teplotní průběh na testovací desce naměřený při 1. teplotě zářičů,  $\vartheta_{T_2}$  je teplotní průběh na testovací desce naměřený při 2. teplotě

zářičů,  $\vartheta_{P1}$  je teplotní průběh na produkční desce naměřený při 1. teplotě zářičů,  $\vartheta_{P2}$  je teplotní průběh na produkční desce naměřený při 2. teplotě zářičů) a takto získaným poměrem hodnot teplot vynásobíme hodnoty teplot naměřené na součástce na produkční desce. Výsledkem optimálního nastavení teplot zářičů by potom měl být přepočítaný profil na produkční desce, který je v tolerančních mezích doporučeného teplotního profilu od výrobce pájecí pasty. Úspěšnost takto získaného profilu závisí zejména na úspěšnosti zjištěného „poměru“ teplotních průběhů u testovací desky. V našem případě (Obr. 26) je mírná odchylka od původního naměřeného průběhu v oblasti vrcholové teploty a následného poklesu teploty dána patrně prudkým poklesem teplotních průběhů na Tč.6 (zejména při 275°C).

Pro použití této metody je nutné mít dostatečný počet součástek s různou tepelnou kapacitou na testovací desce. Tepelná kapacita 2 porovnávaných součástek z produkční desky by měla být podobná (v ideálním případě stejná) tepelné kapacitě 2 jiných součástek z testovací desky. Proto bychom na testovací desce měli mít dostatečně širokou škálu součástek, z nichž bychom si v konkrétní situaci vybrali optimální.

Zde uvedený postup je možné aplikovat na libovolné testovací a produkční desky, které obě obsahují součástky s odpovídající si tepelnou kapacitou.

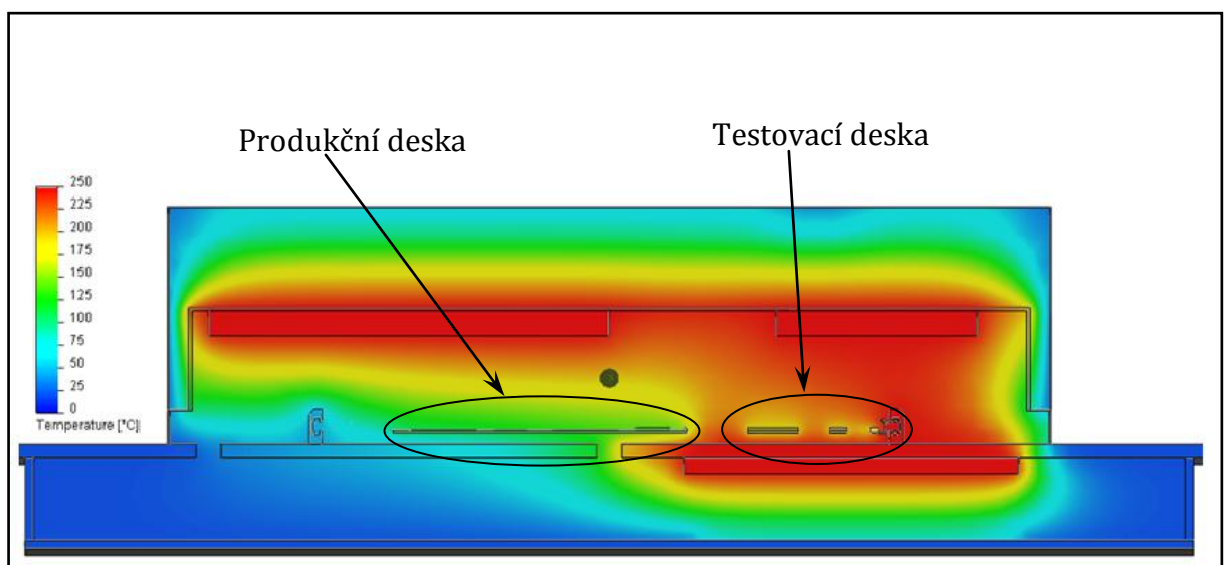
Lze předpokládat, že lepších výsledků při predikci u pohybujícího se dopravníku bychom dosáhli při použití modernějšího typu přetavovací pece s nucenou konvekcí a větším počtem tepelných zón.



### 3. Simulační část

Pro lepší pochopení této náročné problematiky jsem se rozhodl do této práce zahrnout ještě také simulační část. V této části jsem v programu Solidworks nejprve vytvořil model použité DPS a rámečku, přičemž jsem v tomto modelu pro jednoduchost zanedbával použité epoxidové lepidlo, kterým jsou přilepeny termočlánky. Dále jsem taktéž uvažoval dokonale rovné hrany u použitých materiálů, takže při dotýkajících se plochách nastane téměř dokonalý přestup tepla (ve skutečnosti však hrany nikdy dokonale rovné nejsou a přestup tepla bude vždy o něco horší). Nakonec jsem vytvořil i zjednodušený model použité přetavovací pece DIMA SMRO 0180, do které jsem na dopravník umístil sestavu DPS + rámeček přesně tak, jako při měření (model je na příloženém CD). Dále jsem v takto vytvořeném modelu pece se sestavou DPS + rámeček za pomoci pana doc. Ing. Jiřího Maxy, Ph.D. v programu Cosmos nastavoval teploty zářičů a pozoroval přenos tepla.

Velmi zajímavé bylo zjištění, jaké je rozložení tepla v peci po umístění rámečku s deskami. Toto rozložení jsme pozorovali poté, co jsme udělali řez pecí v podélné ose dopravníku.

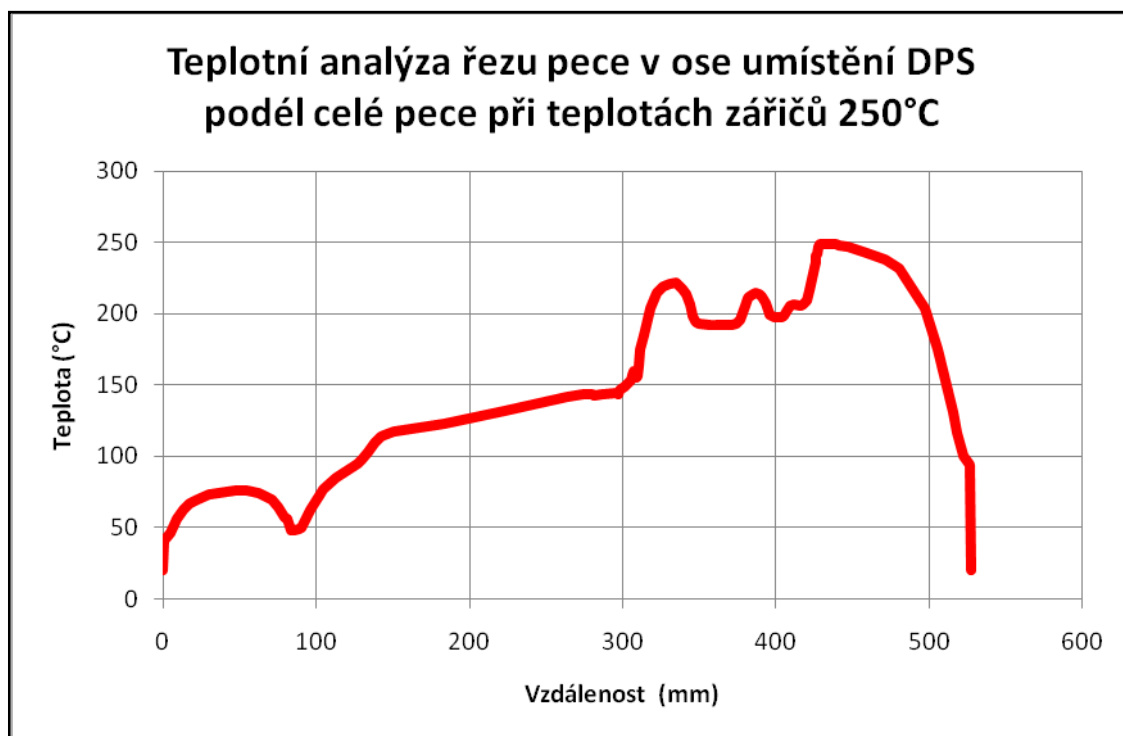


Obr. 27: Rozložení tepla uvnitř pece

Z Obr. 27 je patrné, že prostředí v peci je z hlediska teploty velmi nehomogenní. Jak již bylo uvedeno, toto je způsobeno zejména rozdílnou velikostí horních zářičů, existencí mezery mezi horními zářiči, existencí pouze jednoho spodního zářiče a jeho asymetrickým umístěním (pod pravým horním zářičem), dále rozdílnými materiály, ze kterých jsou vyrobené zářiče a v neposlední řadě je to také nemožnost nastavení všech tří zářičů na stejnou teplotu vyšší jak 30°C.

Rozložení teploty uvnitř pece, jak je patrné z Obr. 27, bude nutné uvažovat v budoucnu při případném navázání na tuto práci, kdy bude předmětem predikce teploty při zapnutém dopravníku. Bude nutné si uvědomit, v jakém bodě se ten či onen termočlánek při průchodu pecí právě nachází a jaká teplota v daném místě vlivem zapnutých zářičů je.

K tomuto úkolu bude vhodné využít také teplotní průběh na Obr. 28. Na tomto obrázku je znázorněno rozložení teploty z Obr. 27 ve výšce DPS – tj. teplota nacházející se v ose DPS.



Obr. 28: Rozložení teploty v ose DPS podél celé pece

## 4. Diskuze dosažených výsledků

Předmětem této práce je zejména predikování teplot součástek a DPS při pájení přetavením. Je zde nastíněn postup, kterým lze teplotu součástek o známé tepelné kapacitě a známé teplotě zářičů v peci predikovat. Tyto teploty jsem predikoval nejprve pro testovací desku při zastaveném dopravníku, přičemž znalosti a poznatky zde nabyté jsem později uplatnil při predikci teplot u produkční desky. Použil jsem zde metodu náhradní matematické funkce, jejímž základem je proložení naměřených teplotních průběhů rovnicí (26) a následné zpracování jejich koeficientů. Úspěšnost této predikce je relativně velmi vysoká. Rozdíl predikovaných a naměřených teplot je v tomto případě u testovací desky ve většině případů od 2°C do 5°C, u produkční byla úspěšnost ještě nepatrně vyšší. Tento malý rozdíl byl způsoben několika faktory:

- Průměrováním hodnot koeficientů pro jednotlivé termočlánky, což napomáhalo řešení této problematiky
- Zanedbáváním epoxidového lepidla při výpočtech
- Nehomogenním prostředím uvnitř pece – i když se může zdát, že termočlánky nejsou daleko od sebe, tudíž by vliv nehomogenního prostředí měl být zanedbatelný, není tomu tak. Jak je patrné z Obr. 27, vlivem mezery mezi horními zářiči dochází ke snížení teploty v této části pece, což se projeví i na naměřených teplotách.
- Patrně největší vliv však na tento rozdíl bude mít nepřesné určení rovnice vedoucí ke koeficientu  $b$ . Pro přesnější určení koeficientu  $b$  by bylo potřeba změřit teploty u dalších materiálů s různou tepelnou kapacitou, čehož však díky náročnosti této problematiky nebylo dosaženo.

Jednoduché programy určené k predikci teplot součástek při zastaveném dopravníku jsou na přiložené CD.

Následně jsem poznatky získané při měřeních se zastaveným dopravníkem aplikoval během měření se zapnutým dopravníkem. Nejprve jsem postupoval stejně jako v případě zastaveného dopravníku. Nicméně naměřené teplotní průběhy byly velmi

složité proložit exponenciální funkcí používanou v případě zastaveného dopravníku. Zvolil jsem tedy funkci lineární, nicméně dosažené výsledky nebyly uspokojivé.

Proto jsem se vydal jiným směrem a použil metodu podobnosti tepelných kapacit. Porovnával jsem tedy teplotní průběhy na několika vybraných termočláncích při několika různých teplotách zářičů a hledal souvislosti. Výsledkem bylo zjištění znázorněné na Obr. 26. Je zde patrná závislost mezi tepelnou kapacitou součástky a dobou, ve které je na této součástce naměřena maximální teplota. Se zvyšující se tepelnou kapacitou se bude doba dosažení maximální teploty prodlužovat. Rovněž tak je patrná závislost mezi hodnotou maximální dosažené teploty na součástce a teplotou zářičů, přičemž pokud zvýšíme teplotu zářičů, naměříme také vyšší teplotu na součástce. Pokud tedy budeme mít k dispozici testovací a produkční desku, potom jsme schopni po několika změřeních teplotních profilů testovací desky a jednoho profilu produkční desky určit také další teplotní profily při odlišných teplotách zářičů u produkční desky. Perspektivně bude nutné ověřit funkčnost této metody na jiných substrátových materiálech (např. Al) i na vícevrstvých DPS.

Jako doplňkovou část na rámec zadání jsem se rozhodl do této práce zařadit část simulační. V programu Solidworks jsem se snažil zejména znázornit rozložení tepla uvnitř pece při konkrétním nastavení pece, což výrazně napomáhá pochopení dané problematiky a může být v budoucnu jakýmsi odrazovým můstkem v případě navázání na tuto práci.

Velmi vhodná by však při eventuálním pokračování v této práci byla výměna stávajícího typu přetavovací pece za jiný, modernější, s nucenou konvekcí. Zcela jistě by to napomohlo k vyšší úspěšnosti při predikci teplot.

## 5. Závěr

V této práci jsem se zabýval problematikou predikce teplot součástek a DPS během pájení přetavením. Práce je členěna do několika částí, přičemž důraz je kladen zejména na praktickou část. V teoretické části jsem uvedl stručný úvod do této problematiky, poté jsem se v praktické části zabýval již postupem samotné predikce teplot. Pro predikci teplot při zastaveném dopravníku jsem zpracoval jednoduchý softwarový program, který predikci maximálně usnadňuje, a pomocí něhož zjistíme konkrétní teplotu v konkrétním časovém okamžiku. Pro případ zapnutého dopravníku jsem zde nastínil postup, pomocí kterého dosáhneme optimalizace teplotního profilu, což byl hlavní úkol této diplomové práce.

Nad rámec zadání je zde uvedena simulační část, na kterou se lze v budoucnu zaměřit a využít ji při vytváření softwarového programu pro predikci teplot při zapnutém dopravníku.

Celkově tedy tato práce nastiňuje určité možnosti při predikci teplot součástek během pájení přetavením, nicméně vzhledem k náročnosti této problematiky nebyla práce rozpracována do detailů, na což by bylo vhodné navázat v budoucnu.

Uvedené poznatky by bylo také vhodné využít a zahrnout do softwarového programu, který by vypočítával PWI (process window index) u přetavovacího profilu.

## 6. Seznam obrázků

Obr. 1: Vsázková přetavovací pec, typ T-962.....	9
Obr. 2: In-line přetavovací pec, typ FC220.....	9
Obr. 3: Podélný teplotní profil typu RTS.....	18
Obr. 4: Podélný teplotní profil typu RSS.....	18
Obr. 5: Termoelektrický článek.....	19
Obr. 6: Termočlánek typu K.....	20
Obr. 7: Umístění termočláneků na desce.....	24
Obr. 8: Průběžná přetavovací pec DIMA SMRO 0180.....	28
Obr. 9: Umístění testovací a produkční DPS při měření.....	29
Obr. 10: Naměřené teploty na termočlánek č.5.....	30
Obr. 11: Naměřené teploty na termočlánek č.6.....	31
Obr. 12: Naměřené teploty na termočlánek č.7.....	31
Obr. 13: Rozdíl teplot na jednotlivých termočláncích při použití rámečku a bez rámečku....	32
Obr. 14: Příklad náhradní matematické funkce pro Tč.6 při teplotách zářičů 200°C bez použití rámečku.....	33
Obr. 15: Hodnoty koeficientů $A$ , $b$ a $y_0$ u Tč.5, Tč.6 a Tč.7.....	34
Obr. 16: Průběhy průměrných hodnot koeficientů $A$ a $y_0$ a jejich rovnice regrese pro Tč.5, Tč.6 a Tč.7.....	35
Obr. 17: Průběh hodnot koeficientu $b$ a jeho rovnice regrese u Tč.5, Tč.6 a Tč.7.....	36
Obr. 18: Naměřené teploty na termočlánek č.3.....	39
Obr. 19: Hodnoty koeficientů $A$ , $b$ a $y_0$ u Tč.3.....	39
Obr. 20: Naměřené teploty na Tč.3 a rovnice regrese pro 275°C.....	42
Obr. 21: Naměřené teploty na Tč.5 a rovnice regrese pro 275°C.....	42
Obr. 22: Naměřené teploty na Tč.6 a rovnice regrese pro 275°C.....	43
Obr. 23: Naměřené teploty na Tč.7 a rovnice regrese pro 275°C.....	43
Obr. 24: Průběh hodnot koeficientu $A$ pro jednotlivé termočlánek.....	45
Obr. 25: Hodnoty koeficientů $b$ v závislosti na tepelné kapacitě.....	45
Obr. 26: Teplotní průběhy na Tč.1 a Tč.6 při teplotách zářičů 225°C a 275°C a rychlosti dopravníku 10,93cm/min.....	47
Obr. 27: Rozložení tepla uvnitř pece.....	49
Obr. 28: Rozložení teploty v ose DPS podél celé pece.....	50

## 7. Seznam tabulek

Tabulka 1: Vybrané materiály a jejich hodnoty tepelné vodivosti .....	12
Tabulka 2: Vybrané materiály a jejich hodnoty měrné tepelné kapacity .....	12
Tabulka 3: Seznam vybraných bezrozměrných čísel .....	14
Tabulka 4: Typ proudění podle velikosti $Ra$ .....	15
Tabulka 5: Konstanty platné pro volnou konvekci vzduchu .....	15
Tabulka 6: Úhlový součinitel a součinitel vzájemné radiace u některých jednoduchých uspořádání .....	17
Tabulka 7: Vybrané termočlánky a jejich vlastnosti .....	20
Tabulka 8: Elektrické veličiny a odpovídající tepelné veličiny .....	21
Tabulka 9: Nastavované teploty zářičů.....	29
Tabulka 10: Hodnoty koef. $A$ , $b$ a $y_0$ pro Tč.5, Tč.6 a Tč.7 při daných teplotách zářičů.....	33
Tabulka 11: Příklady naměřených a předpovídaných teplot pro testovací desku .....	37
Tabulka 12: Příklady naměřených a předpovídaných teplot pro testovací desku .....	41
Tabulka 13: Hodnoty koeficientů $A$ a $b$ pro jednotlivé termočlánky.....	44

## 8. Seznam použité literatury

- [1] J. Starý, P. Kahle, Plošné spoje a povrchová montáž. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. 208 stran
- [2] S. Elberg, P. Mathonnet, Odvod tepla z elektronických zařízení, SNTL, Praha 1983. 143 stran
- [3] G. Künzeli, Matematické modely sdílení tepla v konstrukcích elektroniky, Academia, Praha 1990, ISBN 80-200-0165-4, 245 stran
- [4] doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc., Povrchová montáž, [cit. 29.4.2010]. Dostupné z WWW:  
[http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/07\\_povrchova\\_montaz.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/07_povrchova_montaz.pdf)
- [5] J. Starý, M. Zatloukal, P. Stejskal, Montážní a propojovací technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. 262 stran
- [6] J. Strapko, Měření teplotních profilů SMD pouzder. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. 262 stran
- [7] M. Procházka, Optimalizace procesu strojního pájení vlnou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. 262 stran
- [8] UMEL FEKT VUT v Brně, Pájení v elektrotechnice, [cit. 5.5.2011]. Dostupné z WWW: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice/>
- [9] Comet system, Teplotní sondy s termočlánky typu K, [cit. 5.5.2011]. Dostupné z WWW: <http://www.cometsystem.cz/teplotni-sondy-termoclanky.htm>



- [10] doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc., Mikroelektronika a technologie součástek, [cit. 10.5.2011]. Dostupné z WWW:  
[http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/MMTE\\_L.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/MMTE_L.pdf)
- [11] Abe.tec, Průběžná přetavovací pec FC220, [cit. 10.5.2011]. Dostupné z WWW:  
<http://www.abetec.cz/produkty/smt/pajeni-pretavenim-malych-serii/prubezna-pretavovaci-pec-fc220.html>
- [12] Stumobil, Pájecí pece, [cit. 10.5.2011]. Dostupné z WWW:  
[http://www.unlock.cz/zarizenihtml/air\\_ir.php](http://www.unlock.cz/zarizenihtml/air_ir.php)
- [13] Kester, surface mount materials, [cit. 20.5.2011]. Dostupné z WWW:  
<http://www.kester.com/SideMenu/Products/SurfaceMountMaterials/NoCleanSolderPaste/tabid/244/Default.aspx>

## 9. Seznam symbolů

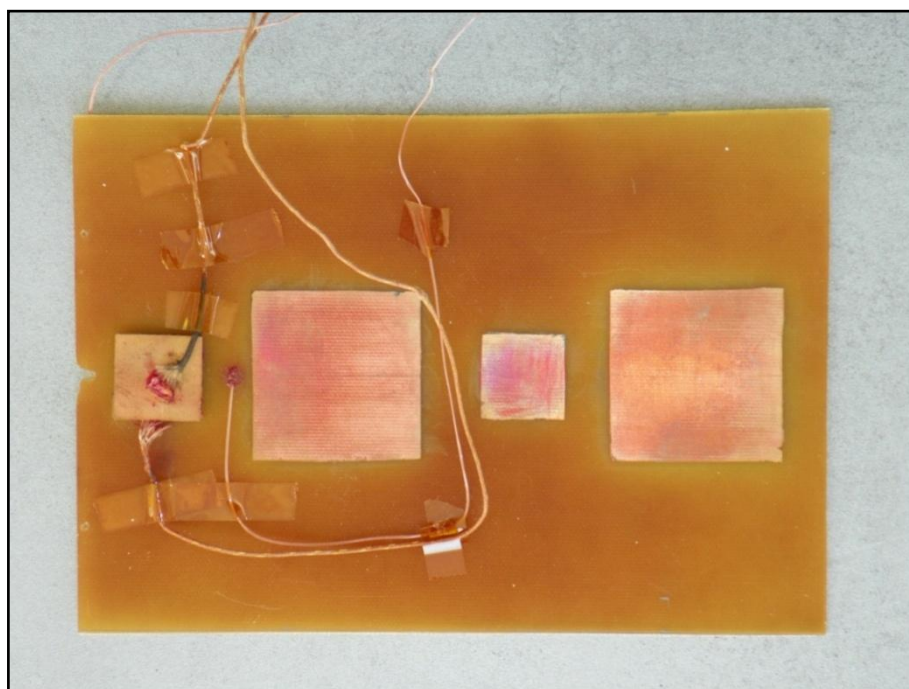
$c$	[J/kgK]	Měrná tepelná kapacita
$C$	[J/K]	Tepelná kapacita
$C_{el}$	[F]	Elektrická kapacita
$C_p$	[J/kgK]	Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku
$D$	[m]	Charakteristický délkový rozměr
$E_{MS}$	[V]	Termoelektrické napětí
$F_A$	[-]	Úhlový součinitel
$F_\varepsilon$	[-]	Součinitel vzájemné radiace
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Gravitační zrychlení
$G_{el}$	[S]	Elektrická vodivost
$Gr$	[-]	Grashofovo číslo
$I$	[A]	Elektrický proud
$L, l$	[m]	Délka
$m$	[g]	Hmotnost
$Nu$	[-]	Nusseltovo číslo
$Pr$	[-]	Prandtlovo číslo
$q$	[W/m <sup>2</sup> ]	Hustota tepelného toku
$Q$	[J]	Teplo
$Q_{el}$	[C]	Elektrický náboj
$Ra$	[-]	Rayleighovo číslo
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$R_{el}$	[ $\Omega$ ]	Elektrický odpor
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha
$T$	[K]	Absolutní teplota
$t, \vartheta$	[°C]	Teplota
$t, \tau$	[s]	Čas
$t_p$	[°C]	Předpovídaná teplota
$t_z$	[°C]	Změřená teplota

$t_{z\acute{a}\acute{r}.}$	[°C]	Teplota nastavená na zářičích
$U$	[V]	Elektrické napětí
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Objem
$W_{th}$	[K/W]	Tepelný odpor
$\alpha$	[W/m <sup>2</sup> K]	Koeficient přestupu tepla
$\beta$	[K <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel objemové roztažnosti
$\epsilon$	[-]	Emisivita
$\eta$	[Pa s]	Dynamická viskozita
$\Theta$	[K]	Teplota povrchu tělesa
$\lambda$	[m]	Vlnová délka
$\lambda$	[W/m K]	Tepelná vodivost
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota
$\kappa$	[m <sup>2</sup> /s]	Součinitel teplotní vodivosti, tepelná difuzivita
$\sigma$	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]	Stefanova-Boltzmannova konstanta
$u$	[m/s]	Charakteristická rychlost proudění kapaliny
$\Phi$	[W]	Tepelný tok
$\Phi_z$	[W]	Ztrátový tepelný tok
$\psi$	[W/m <sup>2</sup> ]	Hustota zářivého toku
$\psi_{\epsilon}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Hustota zářivého toku dokonale černého tělesa

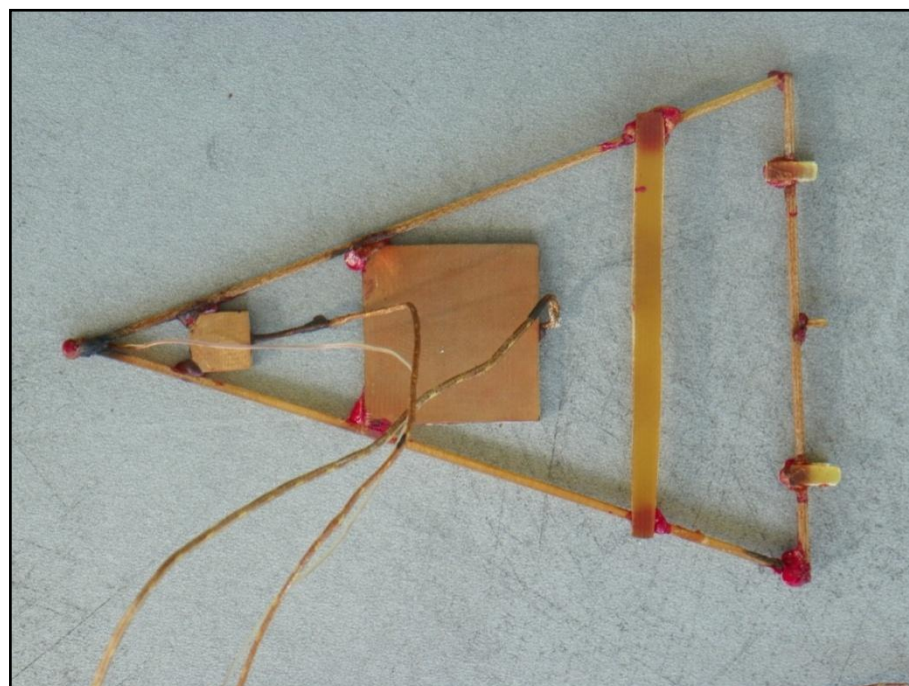
## 10. Seznam zkratek

Ag	Stříbro
Al	Hliník
CD	Compact disc
Cu	Měď
FR4	Fire retardant 4
koef.	Koeficient
např.	Například
RSS	Ramp soak spike
RTS	Ramp to spike
SAC	Bezolovnatá pájka složená z Sn, Ag a Cu
SMD	Surface mount device
Sn	Cín
SPV	Strojní pájení vlnou
str.	strana
TAL	Time above liquidus
Tč.	Termočlánek
tj.	to je

## 11. Přílohy



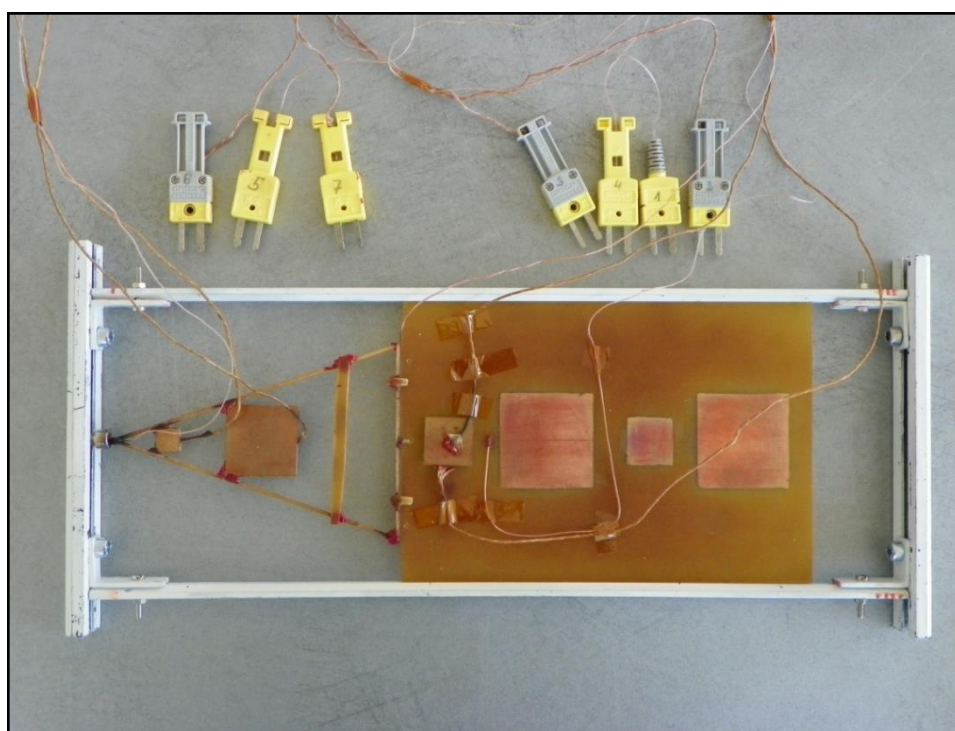
**Příloha 1:** Používaná produkční DPS



**Příloha 2:** Používaná testovací DPS



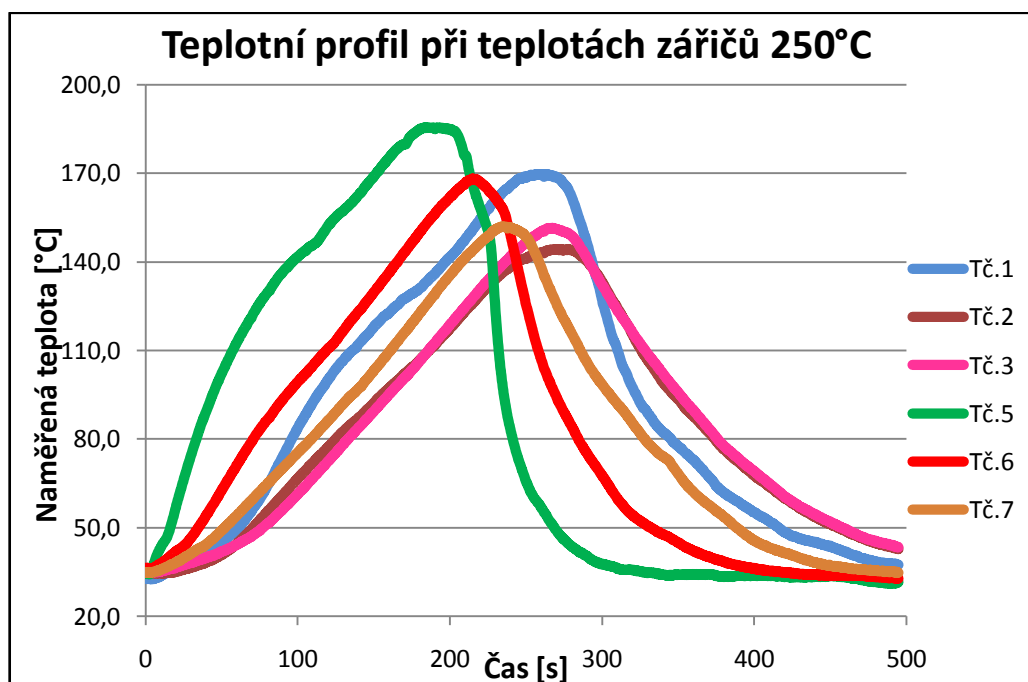
**Příloha 3:** Rámeček pro upevnění DPS



**Příloha 4:** Upevněná testovací DPS a produkční DPS v rámečku

<b>Předpovídání teplot na tč.5, tč.6 a tč.7</b>	
Teplota zářičů [°C]	150
Tepelná kapacita [J/K]	0,35
Čas [s]	230
Koeficient A	-76,661
Koeficient b	75,32925
Koeficient y0	116,0893
<b>Výsledná teplota [°C]</b>	<b>112,4705</b>

**Příloha 5:** Jednoduchý program v excelu určený k predikci teplot na Tč.5, Tč.6 a Tč.7



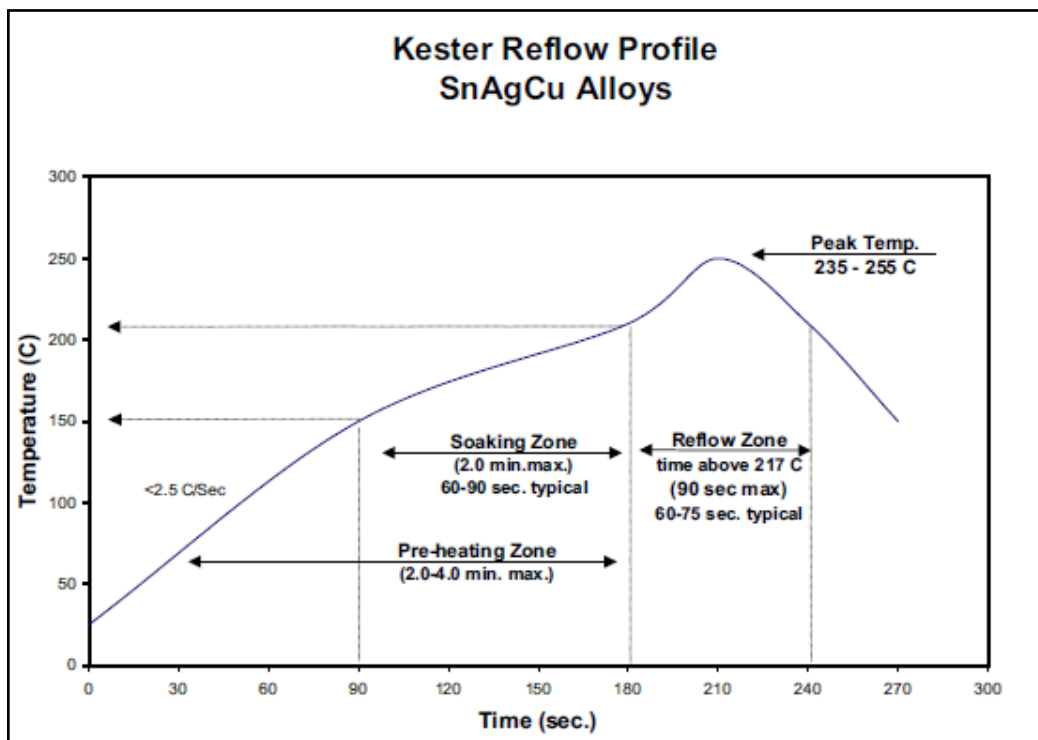
**Příloha 6:** Naměřený teplotní profil při průchodu pecí při teplotách zářičů 250°C

- Výpočet tepelných kapacit materiálů s ostatními termočlánky
  - Materiál se střední tepelnou kapacitou
    - $l_{FR4} = 2 * 1,5 * 10^{-3} = 3 * 10^{-3} \text{ m}$
    - $S_{FR4} = 10 * 10^{-3} * 10 * 10^{-3} \text{ m}^2 = 1 * 10^{-4} \text{ m}^2$
    - $V_{FR4} = S_{FR4} * l_{FR4} = 1 * 10^{-4} * 3 * 10^{-3} \text{ m}^3 = 3 * 10^{-7} \text{ m}^3$
    - $m_{FR4} = \rho_{FR4} * V_{FR4} = 1,876 * 10^6 * 3 * 10^{-7} \text{ g} = 0,5628 \text{ g}$
    - $C_{FR4} = m_{FR4} * c_{FR4} = 0,5628 * 0,6 \text{ J/K} = \underline{0,34 \text{ J/K}}$
    - $l_{Cu} = 2 * 18 * 10^{-6} = 3,6 * 10^{-5} \text{ m}$
    - $S_{Cu} = 10 * 10^{-3} * 10 * 10^{-3} \text{ m}^2 = 1 * 10^{-4} \text{ m}^2$
    - $V_{Cu} = S_{Cu} * l_{Cu} = 1 * 10^{-4} * 3,6 * 10^{-5} \text{ m}^3 = 3,6 * 10^{-9} \text{ m}^3$
    - $m_{Cu} = \rho_{Cu} * V_{Cu} = 8,933 * 10^6 * 3,6 * 10^{-9} \text{ g} = 0,0322 \text{ g}$
    - $C_{Cu} = m_{Cu} * c_{Cu} = 0,0322 * 0,385 \text{ J/K} = \underline{0,01 \text{ J/K}}$
    - $C_{celk.} = C_{Cu} + C_{FR4} = 0,01 + 0,34 \text{ J/K} = \underline{0,35 \text{ J/K}}$
  - Materiál s malou tepelnou kapacitou
    - Tepelnou kapacitu zanedbáváme =>  $C_{celk.} = \underline{0 \text{ J/K}}$
- Produkční deska
  - DPS
    - $l_{FR4} = 1,5 * 10^{-3} \text{ m}$
    - $S_{FR4} = \pi L_{FR4}^2 = 3,1415 * (8,95 * 10^{-3})^2 = 2,5165 * 10^{-4} \text{ m}^2$
    - $V_{FR4} = S_{FR4} * l_{FR4} = 2,5165 * 10^{-4} * 1,5 * 10^{-3} \text{ m}^3 = 3,7748 * 10^{-7} \text{ m}^3$
    - $m_{FR4} = \rho_{FR4} * V_{FR4} = 1,876 * 10^6 * 3,7748 * 10^{-7} \text{ g} = 0,7081 \text{ g}$
    - $C_{FR4} = m_{FR4} * c_{FR4} = 0,7081 * 0,6 \text{ J/K} = \underline{0,425 \text{ J/K}}$
    - $l_{Cu} = 35 * 10^{-6}$
    - $S_{Cu} = 2 * 10^{-2} * 2 * 10^{-2} \text{ m}^2 = 4 * 10^{-4} \text{ m}^2$
    - $V_{Cu} = S_{Cu} * l_{Cu} = 4 * 10^{-4} * 35 * 10^{-6} \text{ m}^3 = 1,4 * 10^{-8} \text{ m}^3$
    - $m_{Cu} = \rho_{Cu} * V_{Cu} = 8,933 * 10^6 * 1,4 * 10^{-8} \text{ g} = 0,1251 \text{ g}$
    - $C_{Cu} = m_{Cu} * c_{Cu} = 0,1251 * 0,385 \text{ J/K} = \underline{0,048 \text{ J/K}}$
    - $C_{DPS} = C_{Cu} + C_{FR4} = 0,048 + 0,425 \text{ J/K} = \underline{0,47 \text{ J/K}}$
  - Simulované pouzdro
    - $l_{FR4} = 1,5 * 10^{-3} = 1,5 * 10^{-3} \text{ m}$
    - $S_{FR4} = \pi L_{FR4}^2 = 3,1415 * (8,95 * 10^{-3})^2 = 2,5165 * 10^{-4} \text{ m}^2$



- $V_{FR4} = S_{FR4} * l_{FR4} = 2,5165 * 10^{-4} * 1,5 * 10^{-3} \text{ m}^3 = 3,7748 * 10^{-7} \text{ m}^3$
- $m_{FR4} = \rho_{FR4} * V_{FR4} = 1,876 * 10^6 * 3,7748 * 10^{-7} \text{ g} = 0,7081 \text{ g}$
- $C_{FR4} = m_{FR4} * c_{FR4} = 0,7081 * 0,6 \text{ J/K} = \underline{0,425 \text{ J/K}}$
- $l_{Cu} = 2 * 18 * 10^{-6} = 3,6 * 10^{-5} \text{ m}$
- $S_{Cu} = 20 * 10^{-3} * 20 * 10^{-3} \text{ m}^2 = 4 * 10^{-4} \text{ m}^2$
- $V_{Cu} = S_{Cu} * l_{Cu} = 4 * 10^{-4} * 3,6 * 10^{-5} \text{ m}^3 = 1,44 * 10^{-8} \text{ m}^3$
- $m_{Cu} = \rho_{Cu} * V_{Cu} = 8,933 * 10^6 * 3,24 * 10^{-8} \text{ g} = 0,1286 \text{ g}$
- $C_{Cu} = m_{Cu} * c_{Cu} = 0,1286 * 0,385 \text{ J/K} = \underline{0,0495 \text{ J/K}}$
- $C_{pouz.} = C_{Cu} + C_{FR4} = 0,0495 + 0,425 \text{ J/K} = \underline{0,48 \text{ J/K}}$
- $C_{celk.} = C_{pouz.} + C_{DPS} = 0,48 + 0,47 \text{ J/K} = \underline{0,95 \text{ J/K}}$
- Materiál mající vliv na Tč.1:
  - Stejná tepelná kapacita jako  $C_{FR4}$ , tj.  $0,425 \text{ J/K}$ .

**Příloha 7:** Výpočet tepelných kapacit materiálů s ostatními termočlánky



**Příloha 8:** Výrobce doporučený přetavovací teplotní profil pro pájecí pastu Kester EM907 [13]