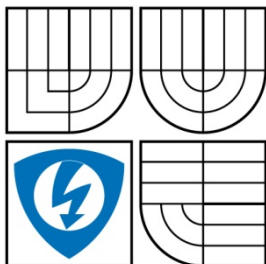


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE



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

# **MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH PROFILŮ BGA POUZDER U PÁJENÍ PŘETAVENÍM**

BGA PACKAGING THERMAL PROFILE MEASUREMENT DURING SOLDER REFLOW PROCESS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

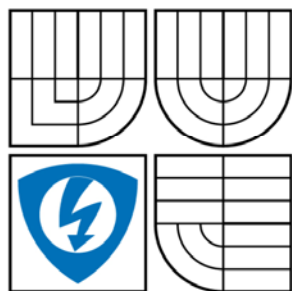
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. ANNA TOMČÁKOVÁ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.**

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

## Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektrotechnická výroba a management**

**Studentko:** Tomčáková Anna Bc.

**ID:** 51565

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2007/2008

### NÁZEV TÉMATU:

**Měření teplotních profilů BGA pouzder u pájení přetavením**

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte metodu pro upevnění termočlánků typu K na BGA pouzdro, porovnejte rozdílné metody upevnění a stanovte chyby metod. Pro sledování teploty použijte profiloměr SLIM KIC 2000. Zabývejte se metodikou měření teplotních profilů během pájení/odpájení funkčních/zkušebních BGA pouzder na testovací DPS a vyhodnocováním teplotních profilů. Simulujte vlivy rozdílných tepelných kapacit DPS a BGA pouzdra na výsledný přetavovací profil. Navrhněte postup optimalizace teplotního profilu pro pájení/odpájení BGA pouzdra pro funkční DPS.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 11.2.2008

**Termín odevzdání:** 30.5.2008

**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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Anna Tomčáková  
Bytem: Pod Švabřovkou 34, 083 01 Sabinov  
Narozen/a (datum a místo): 18.8.1983, Prešov

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....  
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Měření teplotních profilů BGA pouzder u pájení přetavením

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Ústav: Elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- |                                                        |   |                 |   |
|--------------------------------------------------------|---|-----------------|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> tištěné formě      | – | počet exemplářů | 2 |
| <input checked="" type="checkbox"/> elektronické formě | – | počet exemplářů | 2 |

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30.5.2008

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **ABSTRAKT:**

*Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou meranie teplotných profilov PBGA puzdier u spájkovania pretavením.*

*V úvodnej časti sa zaoberá problematikou spájkovania pretavením a faktormi, ktoré ovplyvňujú spoľahlivosť spojov. V ďalšej časti rozoberá princípy činnosti termoelektrických snímačov teploty, ktoré sa bežne používajú pre snímanie teplôt.*

*V praktickej časti práca rozoberá možnosti fixácie termočlánkov pri testovacích meraniach puzdra dummy PBGA osadeného na doske plošných spojov materiálu FR4. Bola tiež navrhnutá metodika merania teplotných profilov pre danú vzorku a to pre testovanie bez záťaže a so simulovanou záťažou PBGA puzdra.*

*Následne sa práca zaoberá možnosťami vyhodnocovania meraných teplotných profilov metódou PWI a optimalizáciou teplotného profilu u spájkovania pretavením.*

## **ABSTRACT:**

*This graduation thesis addresses questions to thermal profile measurement of PBGA package during solder reflow process.*

*The first part of thesis deals with problem of reflow process and reliability factors of solder joint connection. Next part analyses operation principles of thermocouples that are commonly used for temperature measurement.*

*The experimental part deals with methods of thermocouples fixation during tests and measurements of dummy PBGA package. There was realized a method of dummy PBGA thermal profiles measurement and sample testing with and without simulated thermal load on PBGA package.*

*The end of thesis concerns on possibilities of thermal profiles evaluation by using PWI method and thermal profile optimization of reflow process.*

## **Klíčová slova:**

*DPS, PBGA, teplotný profil, spájkovanie pretavením, optimalizácia, termočlánky - meranie pomocou termočlánkov.*

## **Keywords:**

*PCB, PBGA, thermal profile, reflow soldering, profile optimization, thermocouples - measurement with thermocouples.*

**Bibliografická citace díla:**

TOMČÁKOVÁ, A. *Měření teplotních profilů BGA pouzder u pájení přetavením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.

**Prohlášení autora o původnosti díla:**

Prehlasujem, že som túto vysokoškolskú kvalifikačnú prácu vypracovala samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry. Ako autorka uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušila autorské práva tretích osôb, obzvlášť som nezasiahla nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomá následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne: 30.5.2008

.....  
(podpis autora)

**Poděkování:**

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ing. Jiřímu Starému Ph.D., za veľmi užitočnú metodickú pomoc a cenné rady pri spracovaní diplomovej práce. Zvláštne poďakovanie patrí Ing. Tomáši Burešovi zo spoločnosti T.A.M Europe s.r.o. za poskytnutie zázemia a odborných informácií potrebných pre spracovanie diplomovej práce.



## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>ELEKTROTECHNICKÉ PREPÁJANIE</b>	<b>10</b>
2.1	SPÁJKOVANIE	10
2.2	TECHNIKY SPÁJKOVANIA	11
2.2.1	<i>Spájkovanie pretavením</i>	11
2.2.2	<i>Metódy spájkovania pretavením</i>	12
2.3	TAVIVO	13
2.4	SPÁJKOVACIE ZLIATINY	14
2.4.1	<i>Olovnaté spájky</i>	14
2.4.2	<i>Bezolovnaté spájky</i>	15
2.4.3	<i>Tepelné spracovanie zliatin</i>	15
2.5	TEPLOTA A ČAS – TEPLTNÝ PROFIL	16
2.5.1	<i>Pozdĺžny teplotný profil</i>	17
2.5.2	<i>Priečny teplotný profil</i>	18
2.6	VEDENIE TEPLA	19
2.6.1	<i>Vedenia tepla v tuhom telese</i>	19
2.6.2	<i>Zdieľanie tepla medzi dvoma tuhými telesami</i>	20
2.7	TEPELNÉ VLASTNOSTI POLOVODIČOVÝCH SÚČIASTOK	20
2.7.1	<i>Vnútorne tepelné charakteristiky</i>	20
2.8	FAKTORY OVPLYVŇUJÚCE SPOLAHLIVOSŤ SPOJA	21
2.8.1	<i>Termomechanické namáhanie spájkovaného spoja</i>	21
2.8.2	<i>Intermetalické rozhranie</i>	22
2.9	TERMOČLÁNKY	24
2.9.1	<i>Princíp termočlánkov</i>	24
2.9.2	<i>Vyhodnotenie signálov</i>	25
2.9.3	<i>Typy termočlánkov</i>	25
2.9.4	<i>Fixácia termočlánkov</i>	27
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTÁLNA ČASŤ</b>	<b>28</b>
3.1	POPIS POUŽITÉHO VYBAVENIA	28
3.1.1	<i>SlimKIC 2000 ver. 2.0.4.x</i>	28
3.1.2	<i>Oprávkárska stanica PACE TermoFlo 2700</i>	28
3.1.3	<i>Testovacia doska</i>	29
3.1.4	<i>Puzdro PBGA daisy chain</i>	30
3.2	VLASTNÁ FIXÁCIA TERMOČLÁNKOV	31
3.3	METODIKA MERANIA A OPTIMALIZÁCIA TEPLTNÉHO PROFILU	34
3.3.1	<i>Metodika merania</i>	34
3.3.2	<i>Špecifikácia okna procesu</i>	34
3.3.3	<i>Vyhodnotenie</i>	35
3.4	VLASTNÉ MERANIE – VPLYV ROZDIELNEJ TEPELNEJ KAPACITY	38
3.4.1	<i>Bez záťaže</i>	38
3.4.2	<i>Záťaž Cu</i>	44



<b>4</b>	<b>DISKUSIA K EXPERIMENTÁLNEJ ČASTI .....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>ZÁVER .....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK .....</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>POUŽITÁ LITERATÚRA – DOPLNIŤ ROKY U LITERATÚRY .....</b>	<b>55</b>

# 1 Úvod

V procese spájkovania pôsobí množstvo technologických faktorov. Zachytiť a špecifikovať všetky je veľmi náročné, avšak medzi tie najdôležitejšie určite patrí: spájkovací proces ktorý zahŕňa teplotu a dobu spájkovania a rýchlosť chladnutia; spájkované plochy – ich geometria, umiestnenie a povrchová úprava; ďalej je to spájka, zloženie a čistota spájky s ňou spojené použité tavivo a nakoniec je to súčiastka špecifického tvaru a materiálu.

Teplota spájkovania má priamy vplyv na rýchlosť oxidácie spájky na povrchu. Rýchlosť vzniku oxidu cínu so stúpajúcou teplotou rastie priamoúmerne. Ovplyvňuje rýchlosť difúzie kovov kontrolujúcu v procese spájkovania rýchlosť rastu prechodových intermetalických vrstiev. Zásadným spôsobom určuje výslednú tepelnú stabilitu dosky plošných spojov, spájkovacej pasty, súčiastok atď.

Preto je bezpodmienečne nutné stanoviť optimálny teplotný profil. Optimálnym teplotným profilom sa rozumie profil, ktorý eliminuje vznik defektov počas výrobného procesu, zabezpečí maximálnu kvalitu a životnosť spájkovaného spoja .

## 2 Elektrotechnické prepájanie

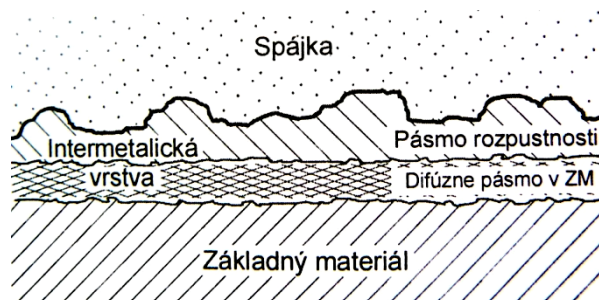
Vodivé spoje sú ako konštrukčné prvky elektronických zariadení realizované dvoma základnými spôsobmi, a to mechanicky a metalurgicky.

Medzi mechanické spoje patrí spájanie pomocou dvoch vodivých materiálov a metalurgické spoje sú realizované zvaraním spojovaných častí alebo spájkovaním.

Ďalšou metódou tvorenia metalurgických spojov je spájkovanie. To spočíva v spájaní elektricky vodivých častí za použitia prídavného materiálu, ktorým je pájka – roztavený kov. Spoj vzniká na hranici spájaných materiálov a spájky.

### 2.1 Spájkovanie

Spájkovanie je spôsob spájania kovových príp. nekovových dielcov roztavenou pájkou - spájkovacou zliatinou za použitia tavív. Veľkou prednosťou tohto procesu je, že plocha plátovaného základného materiálu (s ochranným povlakom), nie je natavená, ale len ohriata na teplotu roztavenia pájky. Pri tomto fyzikálne – chemickom procese nastáva difúzia, čo je premiestňovanie atómov (iónov) spájky i podkladového základného materiálu. Atómy spájky a podkladového kovu sa tak dostávajú na malé vzájomné vzdialenosti, prenikajú do narušenej atómovej mriežky spájkovaného kovu, čím dochádza k vzniku spoja.



Obr. 2.1 Schéma vzniku spoja [6]

Proces spájkovania je špecifický a odvíja sa od teploty použitej spájky. Podľa tohto kritéria rozlišujeme tvrdé a mäkké spájkovanie. Pájky pre tvrdé spájkovanie majú teplotu tavenia vyššiu ako 450 °C. Mäkké spájkovanie operuje pri teplotách pod 450 °C, čo ho v oblasti elektroniky predurčuje k väčšinovému používaniu pre vytváranie vodivých spojov.

## **2.2 Techniky spájkovania**

Z technologického hľadiska sa spájkovanie rozdeľuje na tri základné spôsoby a ako vyplýva z názvu, je odvodené od technického prevedenia procesu. Je to spájkovanie spájkou – ručne, vlnou a pretavením, čo sú techniky strojného spájkovania.

Ručné spájkovanie s použitím spájky je využívané prevažne na konci technologického procesu, pri opravách osadených dosiek alebo pripájaní súčiastok neštandardných tvarov.

Strojné spájkovanie sa uplatňuje ako primárny spôsob výroby spojov. Obrovskou výhodou je rýchlosť, spoľahlivosť, reprodukovateľnosť, ale aj nízke náklady výrobného procesu. Ako už bolo spomenuté, ide o spájkovanie vlnou a pretavením, patrí sem ale i selektívne spájkovanie

Spájkovanie vlnou sa používa pri doskách s vývodmi osadzovanými do dier, bežne sa však používa aj po osadení súčiastkami pre povrchovú montáž. Táto metóda je veľmi rozšírená v oblasti montážnych technológií.

Spájkovanie pretavením pozostáva z dvoch krokov. Prvým je nanosenie spájkovacej pasty na dotykové plošky substrátu, prípadne guličiek spájky (pri osadzovaní BGA puzdier). Druhým krokom sa rozumie pretavenie pasty (spájky) dosiahnuté vopred špecifikovaným teplotným profilom.

### **2.2.1 Spájkovanie pretavením**

Spájkovanie pretavením dnes v technológii povrchovej montáže prevláda pretože v porovnaní s inými metódami má značné výhody.

Prvou z nich je fakt, že spájkovacia zliatina a tavivo sa aplikujú výhradne na miesta, kde je potrebné vyrobiť spoj. Ďalšou výhodou je, že proces spájania nie je sprevádzaný teplotnými výkyvmi. Je zabezpečený presný technologický postup aplikácie pasty, čo zvyšuje hustotu montáže. Nakoniec je nutné spomenúť, že je možná aj obojstranná montáž dosiek plošných spojov, čím sa zvyšuje efektívnosť využitia povrchu montážnej dosky.

Konštrukcia zariadení určených na spájkovanie pretavením je navrhovaná tak, aby zabezpečila rýchle zahriatie spájkovaných spojov. Tepelná kapacita zdroja tepla musí byť dostatočne veľká, aby nastavená teplota spájkovania bola udržiavaná v rozmedzí  $\pm 6$  °C. Zdroj tepla nesmie poškodzovať dosku ani súčiastky.

## **2.2.2 Metódy spájkovania pretavením**

### **Konvekčné spájkovanie**

Tento typ spájkovania sa radí medzi najpoužívanejšie metódy s je postavený na šírení tepla prúdením.

Energia potrebná na pretavenie spájkovacej pasty sa získava prúdením ohriateho plynu (dusík, vzduch, vodík). Ten je možné usmerniť pomocou špeciálnych trysiek na stanovené miesta, čím sa urýchli ohrev DPS.

### **Spájkovanie infračerveným žiarením**

Infraohrev je charakteristický relatívne vysokou účinnosťou procesu, čo je 60 - 70 %. Ako napovedá názov, energia potrebná na pretavenie pasty pochádza z infračervených žiaričov. Negatívom je, že množstvo tepla, ktoré súčiastka absorbuje je závislé na farbe jej povrchu a odráža sa na kvalite spájkovania.

### **Spájkovanie pomocou laseru**

Spájkovanie pomocou laseru sa využíva nie len pre vývodové súčiastky, ale aj pre formovanie špeciálnych spojov, pričom pretavenie pasty spôsobí laserový paprsok. Metóda umožňuje dávkovanie presného množstva energie na miesto spoja. K pozitívam taktiež nepochybne patrí minimálne teplotné namáhanie súčiastok za pôsobenia vysokých pretavovacích teplôt, možnosť aplikácie rozdielnych pájok a flexibilita procesu. Vo výsledku však ide o pomerne zdĺhavý a cenovo nevýhodný proces.

### **Kondenzačné metódy**

Metódy kondenzačné, inými slovami metódy spájkovania v parách, sú založené na kondenzácii nasýtených pár fluorovaných uhl'ovodíkov, do ktorých je osadzovaná doska ponorená. Ku kondenzácii dochádza na chladnejších častiach montážneho celku, uvoľňuje sa pri tom tepelná energia, ktorá celok ohrieva. Teplo sa zvyšuje, až dôjde k pretaveniu spájkovacej pasty a následne k varu spájkovacieho média, teplota ktorého je vtedy vyššia ako teplota spájkovania. Výhodou metódy je, že nedochádza k prehriatiu montážneho celku, je vhodná pre osadzovanie BGA puzdier a neprítomnosť kyslíku umožňuje používať tavidlá s malou aktivitou.

## Kontaktné metódy

Do kategórie kontaktných metód patrí spájkovanie vyhriatym nástrojom, teda aj klasické ručné spájkovanie. Hlavnou zásadou je efektívny prenos tepla pri optimálnych pracovných teplotách. Pri výrobe spoja, ktorý má spĺňať požiadavky na akosť, je nutné zohľadniť niekoľko kritérií. Za prvé je nutné dosiahnuť takú teplotu hrotu nástroja, ktorá zaistí pretavenie pájky. Ďalej je nutné vybrať vhodný typ tavidla a spájkovacej zliatiny, ktoré sú zastúpené v tzv. trubičkovej\* spájke. Nakoniec je nutné zaistiť dostatočnú spájkovateľnosť spojovaných častí, dostatočné prehriatie spájkovaného spoja a dodržať správnu techniku ručného spájkovania. Táto metóda je charakteristická malou produktivitou, preto je vhodná, ako už bolo spomenuté, hlavne pre opravy spojov, respektíve k spájkovaniu ťažko dostupných súčiastok.

\* Trubičková spájka má formu trubičky, s priemerom min. 0,5mm. Vnútorň kanálik/kanáliky obsahujú tavivá.

## Selektívne spájkovanie

Ide o pomerne novú metódu, ktorá spočíva v presnom selektívnom nanášaní tavidla na miesto, kde má spoj vzniknúť. Taktiež prenos tepla a ohrev je sústredený na konkrétne miesto vzniku spoja. Obrovskou výhodou je menšie tepelné namáhanie súčiastok, možnosť regulácie tepelnej energie podľa veľkosti súčiastky ako aj zamedzenie nebezpečenstva vzniku skratu pri malých odstupoch vývodov súčiastok.

### 2.3 *Tavivo*

Aplikácia taviva, či už v kvapalnej, plynnej alebo tuhej forme má zásadný význam z hľadiska kvality vzniklého spoja. Ide vlastne o katalyzátor, ktorý napomáha optimálnemu procesu vzniku spoja tým, že chráni dotykovú plochu pred oxidáciou pri zvýšenej teplote prípadne odstraňuje povrchové oxidy. Taktiež napomáha prenosu tepla a zlepšuje zmáčavosť spájaných povrchov.

Pôsobenia taviva je však časovo obmedzené. Typické je, že maximálnu aktivitu vykazuje behom spájkovacieho procesu, ale po zreagovaní spojovaných materiálov a vzniku spoja stráca aktivitu, zaniká - je čiastočne alebo úplne vytesnené. Tento jav je závislý na chemickom zložení taviva. Rozlišujeme mierne aktivované živice, tavivá rozpustné vo vode a tavivá, ktorých zvyšky nie je nutné odstraňovať.

Živicové tavivá po spájkovaní vytvárajú lepivú vrstvu, ktorá môže pri náročnejších aplikáciách spôsobovať poruchy. Preto sa tieto tavivá po spájkovaní z dosky odstraňujú.

Tavivá rozpustné vo vode po spájkovaní často vyvolávajú koróziu, preto musia byť taktiež odstraňované.

Posledný typ tavív nie je nutné odstraňovať, pretože ich zvyšky nemajú negatívny vplyv na spoj ani jeho okolie – nespôsobujú koróziu a nie sú agresívne voči okoliu spoja.

Použitie taviva je podmienkou nutnou avšak nie postačujúcou v súvislosti s výslednou kvalitou DPS. Jeho schopnosť odstraňovať povrchové oxidy musí byť preto doplnená dokonalým očistením spájaných povrchov.

## **2.4 Spájkovacie zliatiny**

Spájkovacie zliatiny sú základnou súčasťou celého procesu a vo finále tvoria 75 % spájkovaného spoja. Tento fakt kladie na výber zliatiny maximálnu pozornosť. Ďalšie veľmi dôležité kritéria sú spájkovateľnosť, mechanické a elektrické vlastnosti a cena a dostupnosť.

V najširšom zmysle slova, aplikácia pájky musí zaistiť technologickú zlučiteľnosť s príslušným typom technologického procesu, parametre spájkovaných spojov musia spĺňať požiadavky na akosť finálneho produktu a pájka musí cenovo odpovedať požiadavkám konkrétneho typu výrobku.

Súčasná prax využíva zliatiny tvorené cínom, olovom, striebrom, bizmutom, indiom, antimónom a kadmium. Ide prevažne o binárne zliatiny, ale dobré spájkovacie vlastnosti majú viaczložkové zliatiny. Majoritné postavenie majú zliatiny určené na mäkké spájkovanie - tvoria až 90 % z procesov spájkovania, hlavne v oblasti plošných spojov a elektronických súčiastok miniatúrnych rozmerov.

Keďže ide o vyhotovenie veľkého množstva spojov, je treba použiť nie len spoľahlivé a ekonomicky efektívne spojovacie metódy, ale v súvislosti s trendom udávaným Európskou úniou a radou popredných výrobcov elektronických súčiastok sa kladie dôraz hlavne na znižovanie podielu nebezpečných látok, medzi ktoré patrí aj olovo.

### **2.4.1 Olovnaté spájky**

Literatúra [5] uvádza, že ročne je použitých približne 10 000 ton cínovo-olovenej - SnPb spájky pri výrobe rôznych komponentov. Je to materiál, ktorý sa vyvíjal niekoľko tisícročí

a teda jeho mechanické, fyzikálne ale najmä spájkovacie vlastnosti je možné považovať za „takmer ideálne“ a slúžia ako referenčné hodnoty pri výskume nových druhov spájkov.

Olovnatá eutektická zliatina obsahuje podiel cínu a olova, najčastejšie používaná je Sn63Pb37. Do olovnatých pájok sú pridávané aj ďalšie prvky, ktoré zlepšujú zmáčavosť a roztekavosť, zvyšujú mechanickú pevnosť spoja, potláčajú účinky oxidácie a inak priaznivo ovplyvňujú akosť spájkovaných súčastí.

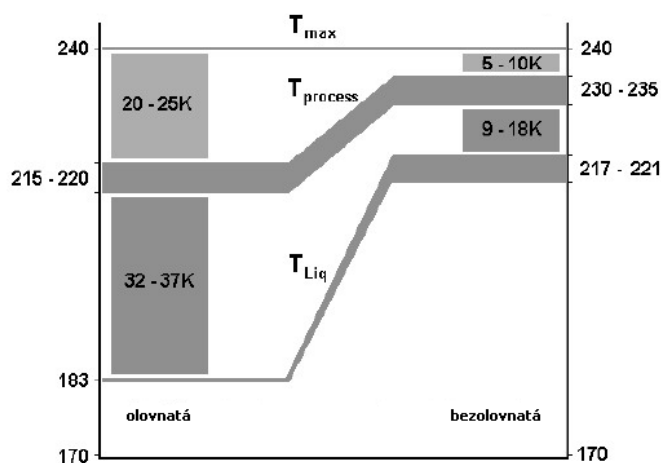
### 2.4.2 Bezolovnaté spájky

Vhodnými alternatívami olovnatých spájkov sa javia bezolovnaté – Lead Free spájky, u ktorých je reálny predpoklad dosiahnutia vlastností podobných, prípadne lepších ako majú spájky olovené. Kritériami pre výber nezávadných spájkov je niekoľko. Základné sú environmentálne, mechanické, fyzikálne, spájkovacie a ekonomické.

Spájkovacie zliatiny bez podielu olova sú charakteristické tým, že v prevažnej väčšine obsahujú minimálne 60% cínu, zvyšok tvoria ďalšie kovy vrátane drahých kovov. Tieto pájky majú v porovnaní so zliatinami obsahujúcimi olovo odlišné charakteristiky, zásadným rozdielom je vyšší teplotný bod tavenia a spájkovania. Preto je nutné pre úspešné a efektívne zahrnutie do procesu výroby zohľadniť voľbu súčiastok, použitých plastov, povrchových úprav a chemických látok, teplotnú odolnosť základného materiálu a elimináciu halogenovaných látok spomaľujúcich polymerizáciu.

### 2.4.3 Tepelné spracovanie zliatin

Proces tavenia zliatin prebieha v teplotnom rozsahu, ktorý je pre rôzne typy špecifický.



Obr. 2.2 Technologické okno pre olovnatú a bezolovnatú zliatinu



Presnejšie povedané, teploty tavenia spájkovacej zliatiny bezolovnatých pájok sú vyššie ako je to u spájok SnPb. Táto vlastnosť vyžaduje, aby konštrukcia pretavovacích pecí spĺňala nasledujúce kritéria: moduly pre predohrev a pretavenie musia dosiahnuť vyšších teplôt a musia mať zabudovaný presný systém regulácie teploty; tesnenie, ložiská a mazivá musia odolávať teplotám okolo 300 °C; nutná kvalitná tepelná izolácia; možnosť použitia ochrannej (dusíkovej) atmosféry a možnosť použitia nových metód – spájkovanie v parách a selektívne spájkovanie.

## **2.5 Teplota a čas – teplotný profil**

Teplotným profilom pre proces spájkovania sa rozumie teplotná závislosť na čase meraná na montážnom celku pri jeho priechode tunelom, ktorý musí byť volený tak, aby bola dosiahnutá kvalitná produkcia a minimalizované možné defekty výrobného procesu.

Sledovanie teplotnej závislosti je dôležité nie len pri spájkovaní pretavením, ale i pri spájkovaní vlnou alebo vytvrdzovaní lepidla. Profil je totiž veľmi špecifický parameter a je potrebné ho optimalizovať nie len pre spomenuté druhy spájkovania, ale i pre rôzne typy montážnych celkov. Rozhodujúce parametre sú odlišné:

Pasta	Montážny celok
<ul style="list-style-type: none"> <li>• typ spájky</li> <li>• typ taviva</li> <li>• podiel kovu</li> <li>• rozmery guliek zliatiny</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hustota osadenia DPS</li> <li>• hmotnosť DPS</li> <li>• rozmiestnenie, typy súčiastok</li> <li>• tepelná vodivosť DPS</li> <li>• tepelná kapacita DPS</li> <li>• jednostranná/ obojstranná SMT</li> </ul>

Ako je uvedené v tabuľke, voľba teplotného profilu sa odvíja aj od typu použitej spájky. Súčasným trendom je náhrada olovnatých spájok vhodnými bezolovnatými alternatívami s docielením podobných až rovnakých vlastností. V princípe však ide o materiály chemicky odlišné, s čím súvisia aj teploty tavenia ich eutektických zliatin.

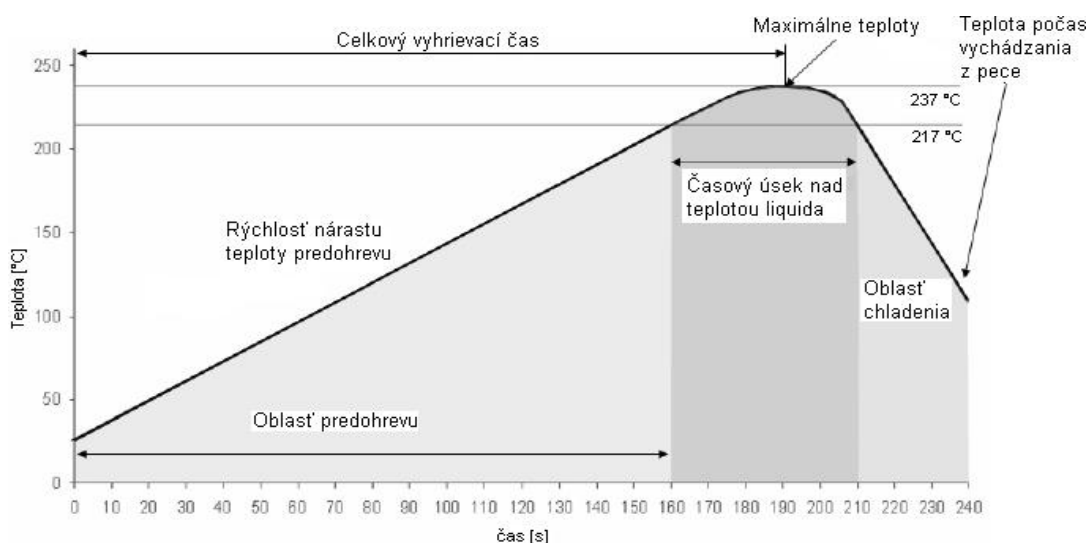
Z hľadiska procesu spájkovania má teplota spájkovania priamy vplyv na rýchlosť oxidácie spájky na povrchu. Rýchlosť vzniku oxidu cínu, či už v olovnatých alebo bezolovnatých spájkach je pri teplote 200 °C dvojnásobne vyššia ako pri teplote 100 °C. Tiež

vplýva na rýchlosť difúzie kovov kontrolujúcu v spájkovacom procese rýchlosť rastu prechodových intermetalických vrstiev. V neposlednom rade výrazne ovplyvňuje tepelnú stabilitu DPS, súčiastok, spájkovacej pasty atď.

### 2.5.1 Pozdĺžny teplotný profil

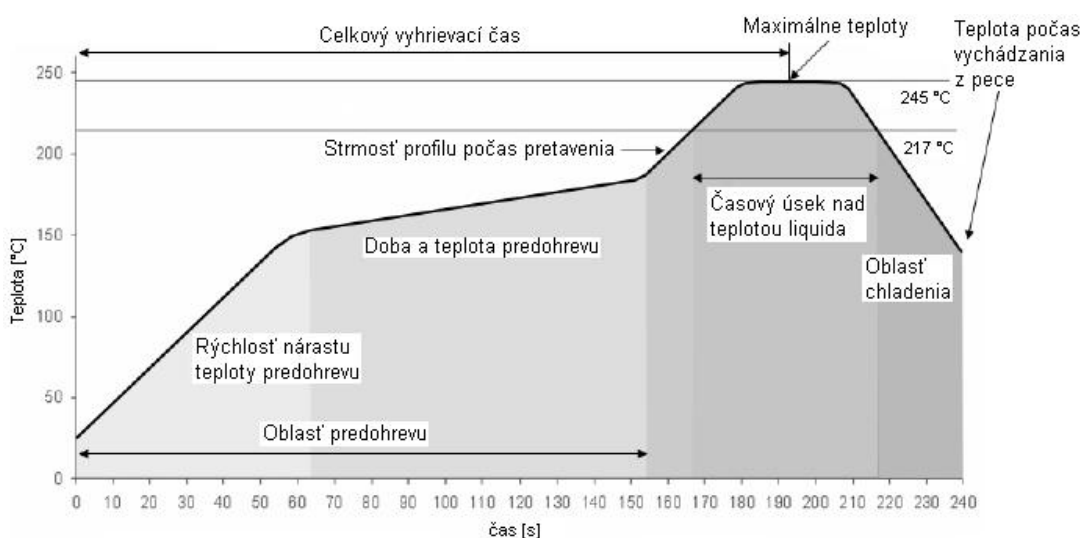
Tento typ slúži hlavne k optimalizácii výrobného procesu nových druhov DPS, ako aj pre kontrolu a dokumentáciu nastavenia procesu podľa aktuálne platných noriem.

#### Lineárny teplotný profil – RTS – Ramp-to-Spike



Obr. 2.3 Ukážka lineárneho teplotného profilu [5]

#### Rampový teplotný profil - RSS – Ramp-Soak-Spike



Obr. 2.4 Ukážka rampového teplotného profilu [5]

Ďalej sa budem podrobnejšie venovať rampovému teplotnému profilu, ktorý je z hľadiska optimalizácie presnejší vďaka vyššiemu počtu parametrov, ktoré sú pri tomto profile zohľadňované:

- rýchlosť (strmosť) nárastu teploty predohrevu – príliš rýchle stúpanie spôsobuje poškodenie súčiastok, prípadne poruchy spájkovaného spoja
- doba a teplota predohrevu – optimálna doba predohrevu je (60 – 160) s a teplota by mala byť v intervale (130 – 165) °C.
- strmosť profilu počas pretavenia – časový úsek tohto deja by nemal presahovať 30 sekúnd, aby sa zamedzilo vyčerpaniu nanoseného taviva. Optimálne je udržať tavivo aktívne počas celej doby. Teplotný gradient by mal byť asi  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$
- časový úsek nad teplotou liquida – dostatočná doba pre dosiahnutie dokonalých spojov sa pohybuje v rozmedzí (205 – 225) °C a to po dobu (40 – 75) s. Príliš krátky čas spôsobí tvorbu nekvalitných spojov a prídlhý čas zuhoľnatie zvyškov taviva.
- maximálne teploty – hodnoty by jednoznačne nemali prekročiť hranicu 250 °C, čím sa zabráni poškodeniu súčiastok, prípadne aj dosky plošných spojov.
- celkový vyhrievací čas - definuje sa počnúc vložением DPS do pece, spoločne s rýchlosťou dopravníku a vzdialenosťou medzi viacerými DPS. Dôležitá je chemická štruktúra pasty, ktorá taktiež potrebuje optimálny vyhrievací čas, aby sa zamedzilo vzniku bublín v spoji.
- oblasť chladenia – rýchlosť chladenia má zásadný vplyv na veľkosť zŕn pájky. Čím rýchlejšie je spoj chladený, tým menšie sú zrná, čo zabezpečuje lepšiu mechanickú odolnosť.
- teplota počas vychádzania z pece – je dôležitá v prípade, že je nutné s doskou následne manipulovať.

### **2.5.2 *Priečny teplotný profil***

Tento profil charakterizuje nerovnorodosť pretavovacieho tunelu, a to v priečnom smere. Je daný konštrukciou pece a ovplyvnený hustotou osadenia DPS. Je na neho kladený dôraz pri zložitejších aplikáciách.

## 2.6 Vedenie tepla

Teploto sa prenáša v priestore z jedného bodu do druhého vplyvom rozdielu teplôt týchto bodov, zákon termodynamiky vraví, že teplo prechádza z miesta s vyššou teplotou do miesta, v ktorom je teplota nižšia.

Pri vedení, ako jedenom spôsobe prenosu tepla, sa teplo zdieľa pôsobením vzájomného dotyku molekúl látky. Buď sa tak realizuje vo vnútri telesa alebo na styčnej ploche tuhých telies.

### 2.6.1 Vedenia tepla v tuhom telese

Teploto, ktoré prejde určitou plochou za dobu, určuje tepelný tok, ktorý touto plochou prestupuje. Ak je plocha jednotková, udáva množstvo tepla, ktoré ňou za jednotku času prechádza, hustotu tepelného toku. Určuje ju Fourierova rovnica

$$q = -\lambda \left( \frac{\delta\theta}{\delta n} \right) \quad (1)$$

kde  $q$  je hustota tepelného toku [ $Wm^{-2}$ ],

$\lambda$  je merná tepelná vodivosť [ $Wm^{-1}K^{-1}$ ],

$\delta\theta/\delta n$  je gradient teploty [ $Km^{-1}$ ] v smere kolmom na plochu  $S$ .

Merná tepelná vodivosť na gradiente nezávisí, je však funkciou materiálu a teploty prostredia. Nasledujúca tabuľka uvádza stručný prehľad teplotných vodivostí materiálov, ktoré sa používajú v elektrotechnickom priemysle.

Tab. 2.1 Merná tepelná vodivosť a kapacita materiálov elektroniky [12, 13]

Materiál	Merná tepelná vodivosť $\lambda$ [ $Wm^{-1}K^{-1}$ ]	Merné teplo $c$ [ $Jkg^{-1}K^{-1}$ ]	Tepelná rozťažnosť TCE [ $10^{-6}K^{-1}$ ]
zlato	311	129	x
meď	386	381	18
kremík	80	752	5
olovo	34,8	129	x
železo	74,7	465	x
tvárny epoxid	1,08	836	x
spájka Sn63Pb37	50	x	25
sklolaminát FR4	0,2	x	14

x - nezistené

Merná tepelná vodivosť sa s teplotou mení, preto je treba uvažovať tú jej veľkosť, ktorá odpovedá strednej teplote telesa. U niektorých materiálov závisí tepelná vodivosť na chemickom zložení.

### **2.6.2 Zdieľanie tepla medzi dvoma tuhými telesami**

Ak k sebe priložíme dve tuhé telesá a vytvoríme časť tepelného obvodu, zistíme, že tepelný odpor stykovej plochy je obvykle väčší ako tepelný odpor materiálov každého z telies. Tento jav je spôsobený nedokonalosťou spojenia: k vedeniu tepla dochádza priamo stykom oboch telies a cez vrstvu plynu, ktorý sa nachádza v miestach, na ktorých sa telesá kvôli nerovnosti povrchov dotýkajú len z časti.

Veľkosť tepelného odporu stykového povrchu teda ovplyvňuje viacero faktorov. Sú to druh použitých materiálov, hladkosť stykových plôch, prítomnosť či neprítomnosť média medzi plochami a veľkosť tlaku, ktorý pôsobí v miesta styku.

## **2.7 Tepelné vlastnosti polovodičových súčiastok**

### **2.7.1 Vnútorne tepelné charakteristiky**

Keďže sú polovodičové súčiastky mimoriadne citlivé na mechanické nárazy či znečistenie vonkajšími prímiesami, ukladajú sa pri výrobe do nepriedušných puzdier. Tie zároveň umožňujú jednoduché pripojenie súčiastky do obvodu.

### **Tepelný odpor polovodičovej súčiastky**

V prípade, že tepelné zdroje zaujímajú celý povrch polovodičového materiálu, ide o typický príklad jednosmerného prúdenia tepla a tepelný odpor udáva vzťah

$$R_{th} = \frac{L}{\lambda S_s} \quad (2)$$

kde  $R_{th}$  je tepelný odpor  $[KW^{-1}]$ ,

$L$  je hrúbka doštičky  $[m]$ ,

$\lambda$  je merná tepelná vodivosť  $[Wm^{-1}K^{-1}]$ ,

$S_s$  je plocha povrchu doštičky  $[m^2]$ .

## Tepelný odpor prechodovej časti

Týmto odporom sa rozumie odpor časti, ktorou sa polovodičová doštička pripevňuje k puzdru. V praxi sa používa niekoľko metód pripevnenia integrovaných obvodov; a to buď priamo k základu puzdra alebo sa k puzdru pripevňuje keramická doštička, na ktorej je vytvorený vlastný obvod. Tepelný odpor celého spojenia má podstatný vplyv na vnútorné tepelné charakteristiky polovodičových súčiastok.

Z tepelného hľadiska sú lepšie spoje, ktoré sú charakteristické veľkou styčnou plochou obvodu s podložkou. V hybridných obvodoch ovplyvňuje tepelné charakteristiky najviac tepelný odpor, ktorý odpovedá tepelnému toku zdieľanému polovodičovou základnou doštičkou a odporom vytvoreným na tenkej izolačnej podložke.

## Tepelný odpor puzdra

Je možné ho definovať len vo vzťahu k istému presne určenému bodu na vonkajšom povrchu puzdra. Veľkosť tepelného odporu závisí do značnej miery na tomto zvolenom bode, ktorý je referenčný.

### 2.8 Faktory ovplyvňujúce spoľahlivosť spoja

#### 2.8.1 Termomechanické namáhanie spájkovaného spoja

Literatúra [7] uvádza, že pri procese spájkovania je spoj mechanicky namáhaný v ťahu a šmyku. Medzi najdôležitejšie faktory, ktoré spôsobujú toto namáhanie patria

- rozdielne teplotné dilatácie súčiastky a substrátu v dôsledku výkonového zaťaženia súčiastky a teplotného cyklovania súčiastky a substrátu.
- vibrácie montážneho celku
- prehnutie montážneho celku.

Pre výpočet mechanického napätia v spoji platí vzťah

$$\sigma = E(\alpha_c - \alpha_s)\Delta T \quad (3)$$

kde  $\sigma$  je mechanické napätie v spoji [ $Nm^{-2}$ ],

$E$  je Youngov modul pružnosti v ťahu [ $Nm^{-2}$ ],

$\alpha_c$  je teplotný súčiniteľ dĺžkovej rozťažnosti súčiastky [ $K^{-1}$ ],

$\alpha_s$  je teplotný súčiniteľ dĺžkovej rozťažnosti substrátu [ $K^{-1}$ ],

$\Delta T$  je rozdiel teplôt tuhnutia a pracovnej teploty [ $K$ ].

Pri teplotnom cyklovaní dochádza vplyvom deformácie intermetallickej fázy ku zníženiu strihovej pevnosti a skrehnutiu spoja.

Pre cyklické namáhanie spôsobené rozdielmi v teplotných rozťažnostiach materiálov platí vzťah (Coffin-Mansonov)

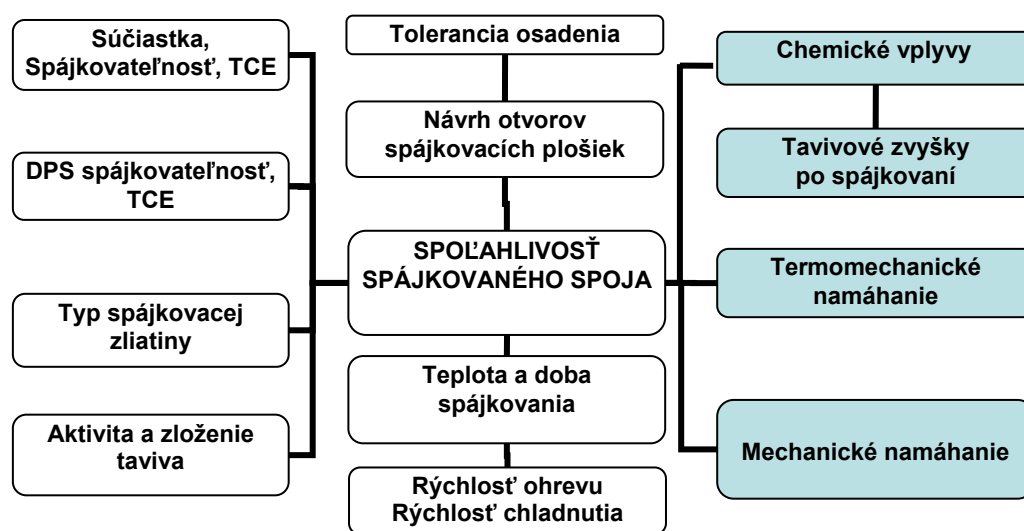
$$N_f = \frac{C}{\delta^2} \quad (4)$$

kde  $N_f$  je počet cyklov do poruchy [-],

$\delta$  je plastická deformácia behom jedného cyklu [-],

$C$  je materiálová konštanta [-].

Nasledujúci obrázok znázorňuje všetky faktory, ktoré ovplyvňujú kvalitu spájkovaného spoja.



Obr. 2.5 Faktory ovplyvňujúce kvalitu spoja

### 2.8.2 Intermetalické rozhranie

Ako už bolo napísané v úvode, pri procese spájkovania dochádza k určitým chemickým a fyzikálnym reakciám na miestach styku povrchových úprav kovov DPS/súčiastok spájky, pričom sú sprevádzané spravidla tepelnou energiou. Keďže roztavená spájka pôsobí pre väčšinu kovov ako agresívne rozpúšťadlo je nutné docieľiť podmienky pre vznik optimálnej

vrstvy intermetalických - medzikovových zlúčenín. Tie majú totiž iné vlastnosti ako spájkované kovy a spájka.

Samotný pojem intermetalické rozhranie je definovaný ako spojitá prechodová intermetalická zóna IMC, ktorá vzniká pri zmáčaní a roztekaní spájky po povrchu, ako pri procese rozpúšťania, tak pri procese difúzie.

Ako uvádza literatúra [12], že difúzna zóna sa začína vytvárať v okamžiku začatia zmáčania tuhého povrchu roztavenou spájkou. Difúzny tok tekutej spájky, ktorá difunduje cez prierez po určitú dobu zo strany s vyššou koncentráciou do strany s nižšou koncentráciou je úmerný koncentračnému gradientu. Difúzia vždy zahŕňa transport hmoty. Pre hrúbku vytvorenej difúznej vrstvy po dobe spájkovania z II. Fickovho zákona platí:

$$Z_0 = \sqrt{Dt} \quad (5)$$

kde  $Z_0$  je hrúbka vytvorenej difúznej vrstvy [m]

$D$  je súčiniteľ difúzie [ $m^2s^{-1}$ ],

$t$  je čas [s].

Súčiniteľ difúzie so zvyšujúcou teplotou exponenciálne rastie, pretože pri dlhšej dobe a teplote spájkovania je spôsobený nadmerný rast hrúbky IMC. Podľa empiricky stanovenej Arrheniovej rovnice platí

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (6)$$

kde  $D_0$  je difúzny koeficient [ $m^2s^{-1}$ ],

$Q$  je aktivačná energia rasti IMC [ $Jmol^{-1}$ ],

$R$  je univerzálna plynová konštanta - 8,314 [ $Jmol^{-1}K^{-1}$ ],

$T$  je teplota [K].

Rýchlosť rastu IMC v závislosti na teplote je daná základnou rovnicou

$$w(t) = w - At^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (7)$$

kde  $w(t)$  je celková hrúbka IMC za dobu  $t$  [m],

$w$  je počiatočná hrúbka [m],

$A$  je konštanta [ $ms^{-1}$ ],



$t$  je čas [s],

$n$  je časový exponent rýchlosti rastu [-],

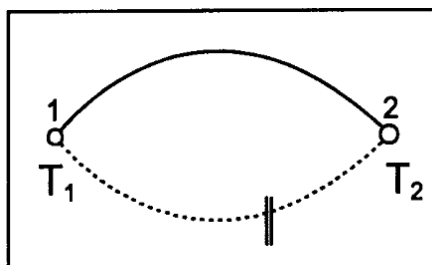
$Q, R, T$  vid' predchádzajúci popis vzorca (7)

## 2.9 Termočlánky

Termoelektrické snímače teploty sú základným prostriedkom pre zaznamenanie a následnú optimalizáciu teplotných profilov. Patria do skupiny kontaktných snímačov, ktoré sa používajú k diaľkovému snímaniu teploty. K tomuto účelu využívajú čidlá – termočlánky, ktoré prevádzajú zmenu teploty prostredia na zmenu elektrického napätia.

### 2.9.1 Princíp termočlánkov

Samotné meranie teploty je založené na princípe Seebeckovho javu. Ten spočíva v jednoduchom elektrickom obvode tvorenom dvoma vodičmi z rôznych kovov. V prípade, že sú oba spoje umiestnené v prostrediach s rôznymi teplotami, začne obvodom prechádzať elektrický prúd. Prerušením obvodu a zaradením meracieho zariadenia je možné zaznamenať určitý rozdiel elektrických potenciálov, ktorý je funkciou rozdielu teplôt  $T_2$  a  $T_1$ . Tento potenciálový rozdiel je nazývaný termoelektrické napätie.



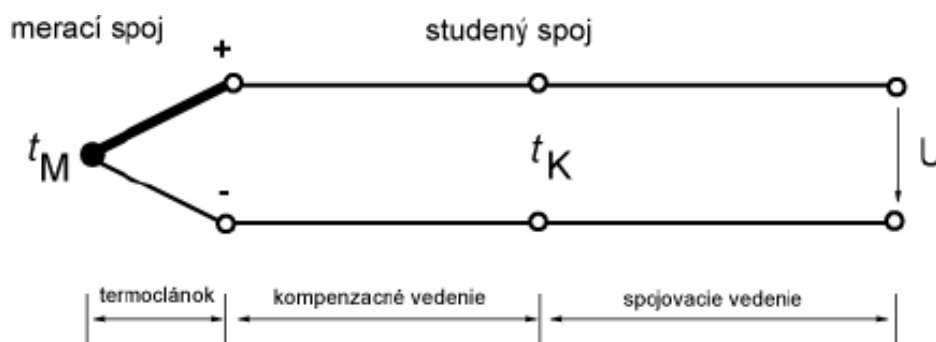
Obr. 2.6 Obvod termočlánku s pripojeným meracím prístrojom [15]

Z hľadiska merania je potrebné, aby generované termoelektrické napätie bolo dostatočne veľké a aby kovy termočlánkov boli odolné voči vonkajším vplyvom, aby sa ich vlastnosti v priebehu času menili minimálne. Takýmto požiadavkám vyhovuje len niekoľko dvojíc materiálov.

Tento typ termočlánku patrí do skupina drôtových termočlánkov, ide o najjednoduchšiu formu termočlánku. Zostáva z dvoch drôtov, ktoré sú k sebe spojené zváraným spojom do guľičky. Ide však o nechránený spoj, preto sú isté obmedzenia v oblasti aplikácie.

## 2.9.2 Vyhodnotenie signálov

Na prvý pohľad sa termočlánky javia ako jednoduché snímače teploty, pretože majú priamo napäťový výstup. Teoreticky je postačujúce ho zosilniť. Problémom je však vznik nežiaducich termoelektrických napätí na spojoch termočlánkov a meracích zariadení, ktoré navyše závisia od teploty referenčného – studeného spoja.



Obr. 2.7 Princíp kompenzácie nežiaducich napätí

Kompenzácia nežiaducich napätí sa dosiahne presunutím spoja tzv. kompenzačným vedením do prostredia s konštantnou teplotou alebo aktívnou kompenzáciou, t.j. vynútením napätie rovnakej veľkosti s opačnou polaritou.

K tomuto účelu sa využíva hardwarová kompenzácia, ktorú tvorí kompenzačná krabica alebo elektronické obvody s operačnými zosilovačmi.

V súvislosti s rastúcim využívaním mikropočítačov sa čoraz častejšie používa tzv. softwarová kompenzácia, ktorá spočíva v meraní teploty referenčného spoja polovodičovým snímačom teploty s následnou číslicovou korekciou v mikropočítači. Tento spôsob je výhodný hlavne pri meraní niekoľkými termočlánkami, ktorých referenčné spoje umiestnime na tzv. izotermálnu svorkovnicu a meriame potom len jedinú korekčnú teplotu pre celú sústavu.

Čidlá sú spravidla pripojené na 3 a viac kanálový teplotný profilomer so zabudovanou pamäťou RAM, kam sú následne namerané dáta zaznamenané. Výstupom merania je grafické spracovanie tepelnej závislosti.

## 2.9.3 Typy termočlánkov

Plášťové termočlánkové sondy sa vyhotovujú v troch typoch meracieho konca: uzemnený, neuzemnený a nechránený typ. V prvom prípade sú konce termočlánku fyzicky

spojené s vnútornou stenou plášťa termočlánku. Neuzemnený – izolovaný termočlánok má spoj oddelený od plášťa sondy. Termočlánok s nechráneným spojom má tento spoj vystrčený von z konca plášťa a je vystavený atmosfére okolia. Tento typ má najlepšiu odozvu, avšak jeho použitie je obmedzené na suché nekorozívne a beztlakové aplikácie [10].



**Obr. 2.8** Prevedenie meracieho konca termočlánkov – zľava - uzemnený, neuzemnený, s nechráneným spojom [10]

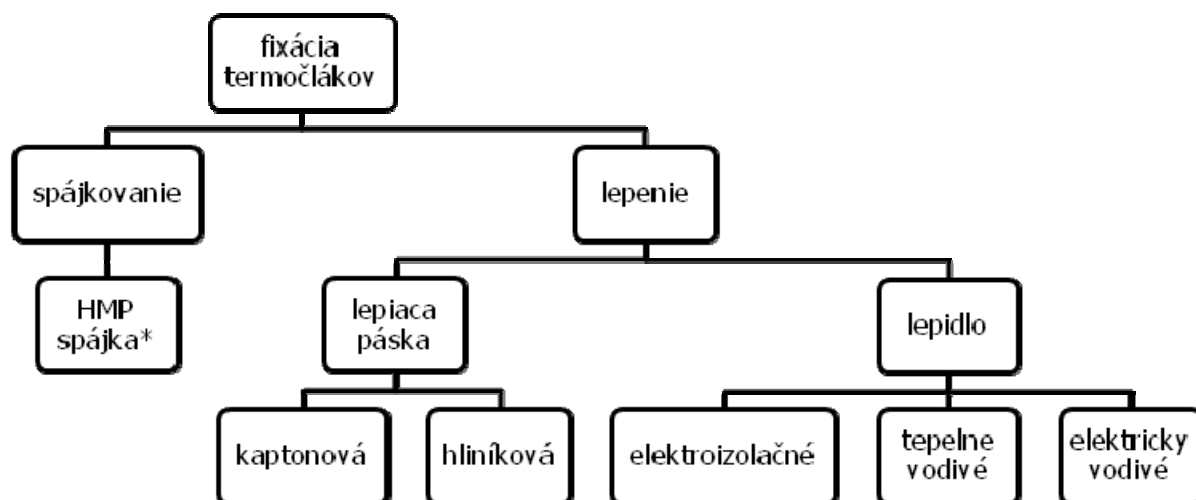
Ďalšie delenie termočlánkov - podľa kalibrácie.

**Tab. 2.2** Najpoužívanejšie typy termočlánkov a ich charakteristiky podľa noriem IEC 584-1 a DIN 43710

Kalibrácia	Pôvodné označenie	Teplotný rozsah [°C]	Trieda presnosti	Tolerancia [°C]
J	Fe-CuNi	-200 - 750	1	$\pm 0,004 \cdot  t $ al. $\pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ v rozsahu (-40 až 750) $^\circ\text{C}$
			2	$\pm 0,0075 \cdot  t $ al. $\pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ v rozsahu (-40 až 750) $^\circ\text{C}$
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	-200 - 1200	1	$\pm 0,004 \cdot  t $ al. $\pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ v rozsahu (-40 až 1000) $^\circ\text{C}$
			2	$\pm 0,0075 \cdot  t $ al. $\pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ v rozsahu (-40 až 1200) $^\circ\text{C}$

Prax v Českej republike operuje hlavne s termočlámkami J a K, ktoré sú tvorené obyčajnými kovmi, ale zastúpené sú aj drahé kovy a to termočlámkami S a B.

#### 2.9.4 Fixácia termočlánkov



Obr. 2.9 Spôsoby fixácie termočlánkov

Upevnenie termočlánku na sledovanú dosku, prípadne spoj je dôležitou podmienkou pre zaistenie presného merania.

Spôsobov upevnenia je niekoľko (viď. Obr. 2.8). Z technického hľadiska je najjednoduchším upevnenie pomocou špeciálnych lepiacich pásiiek. Sú to buď kaptonové alebo hliníkové pásky, ktoré sú charakteristické vysokou tepelnou a chemickou odolnosťou, samozhášavými vlastnosťami, sú to dobré izolanty. Termočlánok je jednoducho prilepený na miesto, na ktorom je požadované teplotu nasnímať.

Ďalšou možnosťou upevnenia je použitie lepidiel na báze epoxidu. Pozitívom je, že teploty vytvrdzovania niektorých lepidiel nedosahujú eutektické teploty bežne používaných spájok; nepresahujú teplotu 150 °C, prípadne sa vytvrdzujú aj pri teplote okolia.

Náročnejšie je upevnenie priamo k spojom súčiastok na doske. To je možné realizovať spomínaným lepením, prípadne i spájkovaním.

Spájkovanie je vhodné použiť len na miesta, kde by po natavení spájkovaného spoja nedošlo k zníženiu jeho akosti. Tomu je možné predchádzať výberom vhodnej spájky. najčastejšie sa používa spájka HMP – High Melting Point, ktorá dosahuje teplotu likvida v rozmedzí (296 - 301) °C. Tým sa vylúči nebezpečenstvo pretavenia spájky na meranom spoji.

## 3 Experimentálna časť

### 3.1 Popis použitého vybavenia

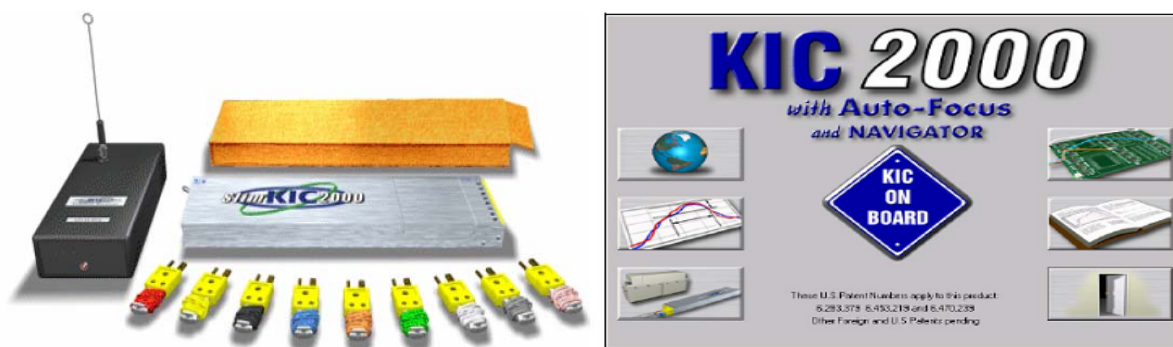
Pre testovanie teplotných profilov PBGA puzdra a rozdielnej kapacitnej zát'aži som zvolila metódu spájkovania pretavením. Konkrétne som používala pretavenie pomocou opravárenskej stanice PACE TermoFlo2700.

#### 3.1.1 SlimKIC 2000 ver. 2.0.4.x

Na zaznamenanie, konfiguráciu a optimalizáciu teplotného profilu počas procesu spájkovania pretavením som použila produkt SlimKic 2000. Je tvorený hardwarovým a programovým vybavením.

Základom hardwarového vybavenia je 9 kanálový snímač, ku ktorému sa následne pripievňujú termočlánky. Jeden je určený na zaznamenanie teploty vzduchu a zvyšných osem je možné upevniť na testovanú dosku plošných spojov.

Softwerové vybavenie umožňuje vstupné nastavenie, ukladanie dát a následný grafický výstup teplotnej závislosti na čase. Obsahuje dôležité nástroje na editáciu globálnych nastavení, na špecifikáciu/úpravu okna procesu, nástroje na prehliadač nameraných profilov a nástroje na spúšťanie a zaznamenanie profilu v reálnom čase.



Obr. 3.1 – 3.2 Hardwarové a softwarové vybavenie SlimKic2000

#### 3.1.2 Opravárenská stanica PACE TermoFlo 2700

Opravárenská stanica PACE TermoFlo 2700, je vybavená spodným a horným predohrevom. Spodný predohrev využíva IR typ vyhrievacieho zdroja. Horný ohrev využíva konvekčné spájkovanie, k čomu slúži pretavovacia tryska, odpovedajúca rozmerom puzdra.

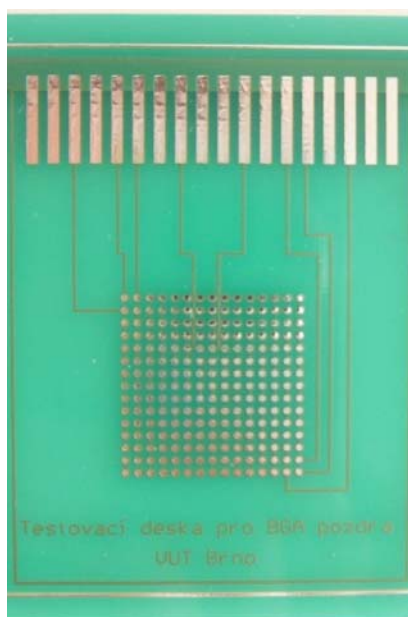
V oboch prípadoch je možné nastaviť potrebnú výšku zdroja a tým regulovať rýchlosť ohrevu dosky, teda celý teplotný profil.



**Obr. 3.2** Opravárenská stanica ThermoFlo 2700 [16]

### **3.1.3 Testovacia doska**

K testovaniu puzdra som použila jednovrstvu dosku z materiálu FR4, čo je vrstvený plátovaný materiál na bázy epoxidu a sklennej tkaniny. Doska bola vyrobená v rámci diplomovej práce na téma montáže a demontáže BGA puzdier.

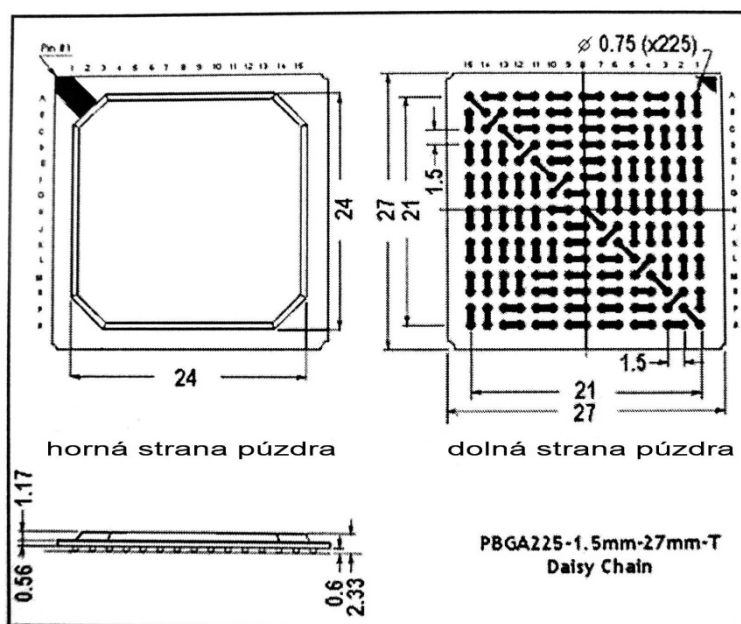


**Obr. 3.3** Testovacia doska pre BGA puzdra (VUT Brno)

Táto doska má rozteč spájkovacích plošiek 1,5 mm a spájkovacie plochy sú vzájomne prepojené tak, že vytvárajú päť obvodov. Tie sa vytvoria v prípade prispájkovania puzdra na DPS. Medené plochy majú priemer 1 mm a sú pripojovacou plochou pre guľičky spájky testovacieho puzdra. Medzi plôškami je medzera 0,5 mm.

### 3.1.4 Puzdro PBGA daisy chain

K montáži a následnému meraniu profilov som použila dummy daisy chain PBGA puzdro firmy TopLine. Je to testovacie puzdro, ktoré neobsahuje integrovaný čip.



Obr. 3.4 Puzdro PBGA daisy chain [9]

### Upevnenie puzdra na DPS

K prispájkovaniu puzdra na testovaciu DPS som použila olovnatú guľičkovú spájku s priemerom 0.76 mm a zložením v pomere 63 % Sn a 37 % Pb.

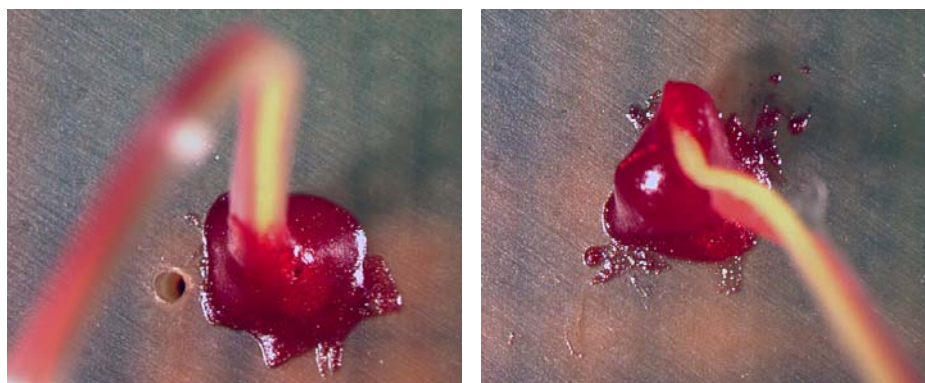
K montáži puzdra som použila opravárenskú stanicu TF 2700. Zvolila som programový mód, kde som nastavila odporúčaný teplotný profil. Po montáži puzdra a vizuálnej kontrole som zistila, že puzdro nesedí na doske rovnobežne s jej horizontálnou osou. Stupeň vychýlenia spôsobil, že určité guľičky na rohu puzdra nevytvorili so spájkovacou plochou spoj, ale boli spojené tenkou vrstvou taviva. Ďalší krok som volila pretavenie v priebežnej peci, kde sa potvrdila výhoda súmernosti puzdra PBGA. Guľičky spájky sa znova pretavili a poloha puzdra sa vystredila, takže puzdro „dosadlo“.

### 3.2 Vlastná fixácia termočlánkov

Teplotný profil som merala pomocou 6 termočlánkov, priamo zabudovaných pod puzdro. Konce termočlánkov som zaviedla do otvorov v doske, vyvrtaných v rohoch a strede puzdra. K fixácii som použila tepelne vodivé lepidlo – pre termočlánky upevnené vo vyvrtaných otvoroch a kaptonovú pásku pre termočlánok upevnený priamo na doske.



Obr. 3.5 Detail zakončenia termočlánku – merací spoj



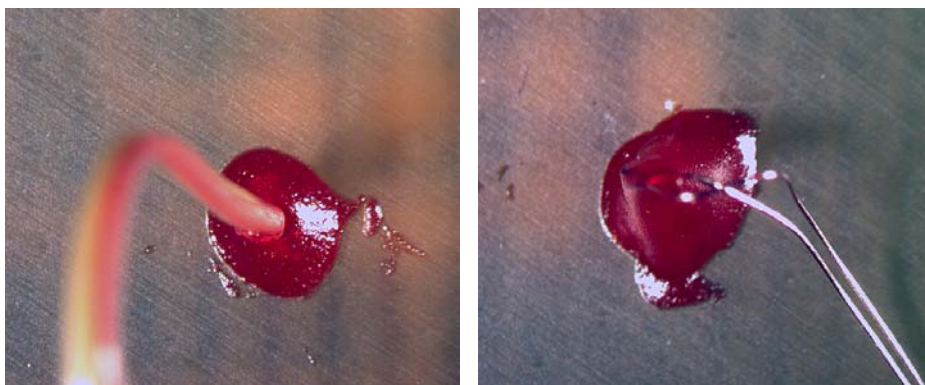
1)

2)



3)





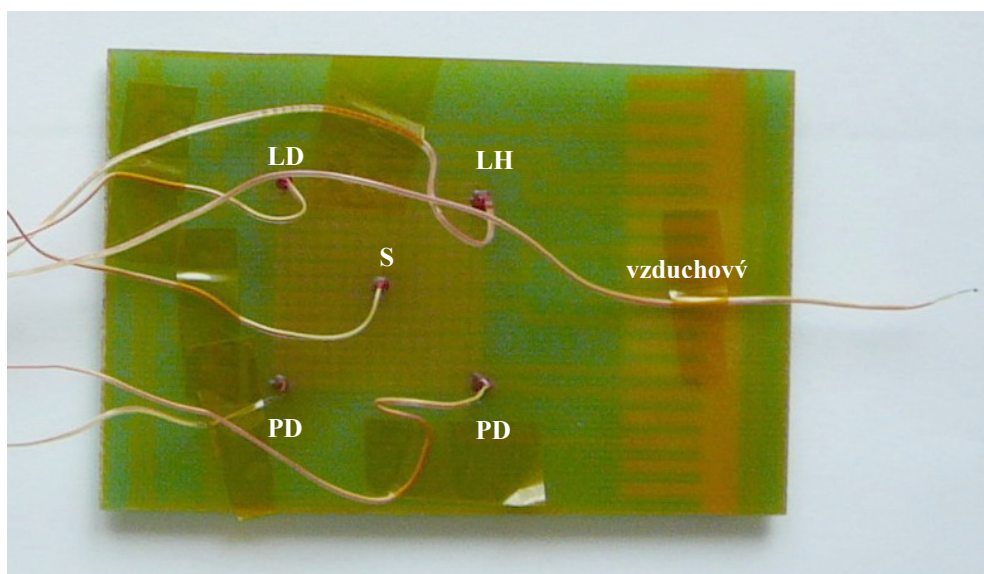
4)

5)

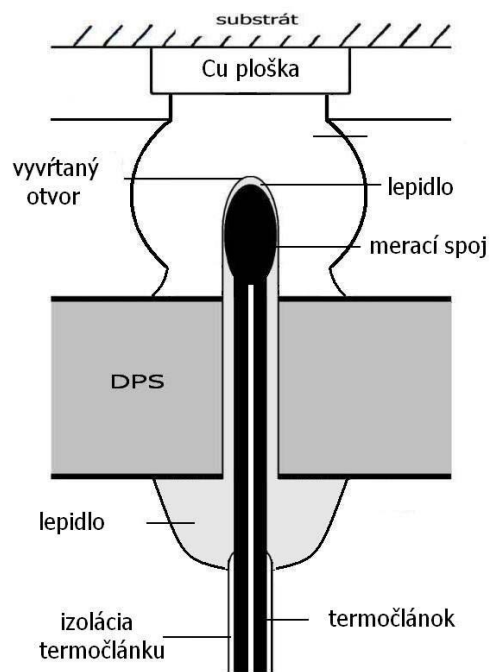
**Obr. 3.6 – 3.10** Detailný náhľad na termočlánky upevnené na testovacej DPS;

1) LH - ľavý horný roh, 2) PH - pravý horný roh, 3) S - stred,

4) LD- ľavý dolný roh, 5) PD - pravý dolný roh.



**Obr. 3.11** Detailný náhľad na testovaciu dosku s upevnenými termočlánkami a ich popisom



**Obr. 3.12** Prierez testovacou doskou v mieste upevnenia termočlánku

### **3.3 Metodika merania a optimalizácia teplotného profilu**

#### **3.3.1 Metodika merania**

Mnou zvolený postup merania teplotného profilu je nasledujúci:

- Upevnenie použitých termočlánkov na testovaciu dosku – vid' kap. 3.2
- Nastavenie hodnôt na opravárenskej stanici PACE TF 2700
  - nastavenie teplôt, časových intervalov a rýchlosti prúdenia ohriateho vzduchu pre zóny – predohrev, zmáčanie, rampa (nárast) teploty, pretavenie;
  - nastavenie doby a rýchlosti chladenia
- Spustenie softwerového vybavenia SK 2000 a nastavenie hodnôt v rámci špecifikácie jeho procesného okna - vid' tab. 3.1
- Spustenie hardwerového vybavenia SK 2000 pre zaznamenanie teplotného priebehu pretavovacieho procesu
- Upevnenie testovacej dosky do svoriek, umiestnenie nad spodný predohrev a vycentrovanie pod hornú pretavovaciu trysku
- Spustenie teplotného procesu na PACE TF 2700
- Po uplynutí teplotného procesu na PACE TF 2700 odsunutie testovacej dosky mimo miesta ohrevu
- Chladnutie testovacej dosky a následné zaznamenanie nameraných hodnôt – softwer SK 2000
- Vyhodnotenie nameraných hodnôt a výpočet PWI – softwer SK 2000.

#### **3.3.2 Špecifikácia okna procesu**

Pred každým meraním je možné v menu softwerového vybavenia SK 2000 nastaviť tzv. globálne parametre ale i špecifikáciu konkrétneho okna procesu. V globálnych parametroch som nastavovala teploty, dosiahnutie ktorých spúšťalo, prípadne končilo proces merania.

Z hľadiska optimalizácie však boli dôležitejšie hodnoty špecifikácie okna procesu. V týchto bolo možné nastaviť typ spájkovacej zliatiny a jej teplotné charakteristiky. Hodnoty,

ktoré som pri použití spájkovacej zliatiny Sn63Pb37 použila, sú uvedené v tab. 3.1. Išlo o hodnoty bežne odporúčané pri spájkovaní spomínaného typu zliatiny.

Zariadenie SK 2000 je navrhnuté konkrétne pre meranie teplotných profilov v procese spájkovania vlnou. V nastavení je tak možné navoliť počet, dĺžku, teplotné rozmedzie jednotlivých zón a rýchlosť posuvníka. Tieto údaje však na vyhodnocovanie procesu nemali vplyv, nastavené teploty boli pomôckou pri sledovaní reálneho priebehu merania.

Užitočná bola možnosť špecifikácie každého termočlánok zvlášť, prípadne nastavenie rovnakých parametrov pre všetky použité termočlánky. V prípade môjho merania som zvolila rovnaké nastavenie pre všetky termočlánky.

Tab. 3.1 uvádza nastavené limity pre testovanie teplotných profilov. Tieto hodnoty som používala pri všetkých meraniach – bez záťaže a so záťažou.

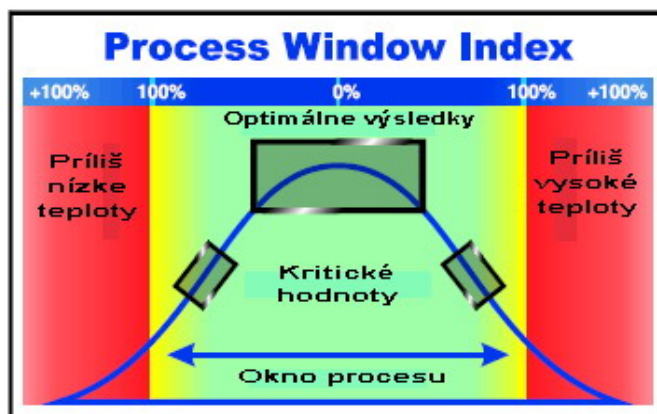
**Tab. 3.1** Nastavenia limitov pre testovanie teplotných profilov

Názov štatistiky	Spodná limita	Horná limita	Jednotky
Max rýchlosť nárastu (cieľ = 2,0) Výpočet nárastu nad 20 s	0,0	3,0	° C/sekundy
Doba predohrevu (130-165) ° C	60	160	sekundy
Doba zmáčania pri (140-170) ° C	50	90	sekundy
Doba nad teplotou likvidácie 183 ° C	40	75	sekundy
Vrcholová teplota	205	225	° C

### 3.3.3 Vyhodnotenie

#### Process Window Index

Index okna procesu, ďalej len PWI, je dôležitý ukazateľ pri vyhodnocovaní a následnej optimalizácii zaznamenaného teplotného profilu. Znárodňuje percentuálnu odchýlku reálneho a užívateľom definovaného profilu v rámci stanoveného intervalu. Jeho stredom je považovaná hodnota 0 % a krajnými hodnotami  $\pm 99$  % - vid' obr. 3.13.

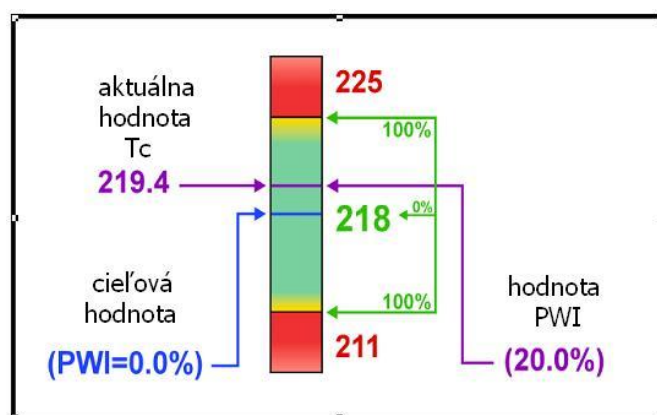


Obr. 3.13 Okno procesu a PWI [14]

V prípade, že PWI sa rovná, prípadne presahuje hodnotu 100 %, znamená to, že výsledný profil neodpovedá vopred špecifikovaným hodnotám a nachádza sa v červenej zóne. Ak sa PWI rovná hodnote 99 %, znamená to, že profil zapadá do intervalu vopred špecifikovaných hodnôt. Ide však o krajnú hodnotu, pri ktorej je vysoké riziko, že teplotný priebeh sa dostane mimo kontrolu.

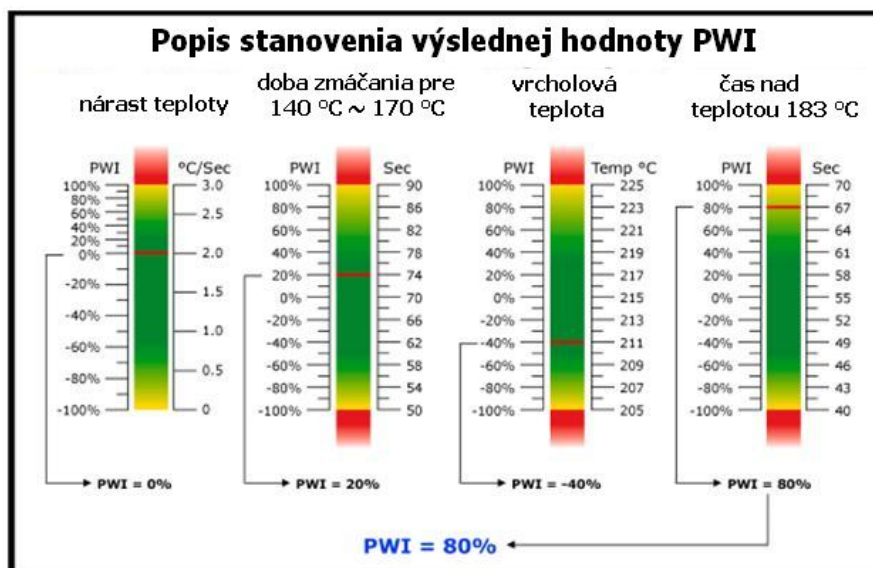
PWI majúce hodnotu nižšiu ako 99 %, napr. 80 % znamená, že profil sa nachádza v intervale a zároveň informuje užívateľa, aké percento okna procesu práve používa: na príklad,  $PWI = 70\%$  - to znamená, že profil využíva 70 % špecifikovaného procesu. PWI teda udáva presnú informáciu o tom, akú hodnotu okna procesu vyžíva daný profil. Platí, že čím nižšia je hodnota PWI a, čím viac sa blíži nule, tým je profil lepší a optimálnejší.

Väčšina užívateľov vyžaduje, aby boli hodnoty PWI pod hranicou 80 % a zvyčajne sú dosahované hodnoty PWI medzi 50 % a 60 %.



Obr. 3.14 Štatistika pre samostatný termočlánok – určenie hodnoty PWI [14]

Na obr. 3.14 je znázornené PWI pre vrcholovú teplotu jedného termočlánku. Hodnota PWI pre kompletnú štatistiku (zahŕňa všetky meracie termočlánky) sa určuje ako najvyššia hodnota v danej štatistike. Napríklad: v prípade, že sa meria so šiestimi termočlánkami a každému termočlánku sú vyhradené štyri profilové štatistiky, výsledkom je sada 24 štatistík pre daný profil.



Obr. 3.15 Stanovenie výslednej hodnoty PWI [14]

Obr. 3.15 znázorňuje, ako sa stanovuje výsledná hodnota PWI pre jeden termočlánok na základe užívateľom zadaných kritických hodnôt.

### Výpočet PWI

Pre výpočet PWI, ktorý zahŕňa štatistické hodnoty všetkých použitých termočlánkov, je daný vzťah

$$PWI = 100 \times \max_{N,M} \left\{ \frac{\sum_{i,j=1}^{i,j=N} \left( nameraná\_hodnota_{[i,j]} - priemerné\_li.mity_{[i,j]} \right)}{\left( rozsah_{[i,j]} \right) \div 2} \right\} \quad (3)$$

kde  $i=1$  až  $N$  (počet termočlánkov),

$j=1$  až  $M$  (počet štatistík na termočlánok),

*namerané hodnoty*<sub>[i,j]</sub> je [i,j]-tá štatistická hodnota

*priemerné limity*<sub>[i,j]</sub> sú [i,j]-té štatisticky najvyššie/najnižšie hodnoty,

*rozsah*<sub>[i,j]</sub> je [i,j]-tý štatistický rozdiel najvyššej a najnižšej hodnoty.

### **3.4 Vlastné meranie – vplyv rozdielnej tepelnej kapacity**

Skúšobnú dosku som testovala pre dva prípady. V prvom prípade som merala a nastavovala teplotný profil pre dosku bez záťaže. V druhom prípade som na puzdre PBGA simuloval záťaž pripevnením medeného plátku.

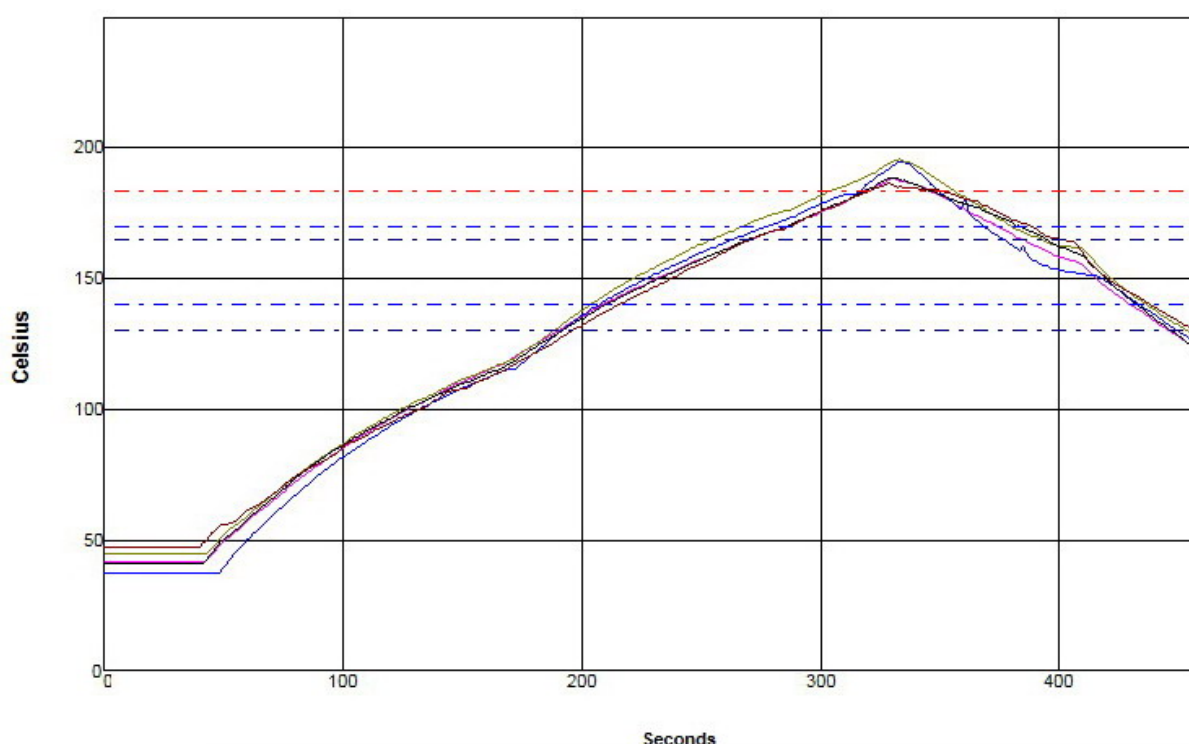
#### **3.4.1 Bez záťaže**

Na úvod som merala a vyhodnocovala teplotný profil pre puzdro bez záťaže. Najprv som nastavovala teploty na opravárenskej stanici PACE TF 2700, kde som teplotný profil rozdelila na päť zón; štyri teplotne špecifikované – predohrev, zmáčanie, rampa (nárast) teploty, pretavenie a piatu nešpecifikovanú - chladenie. Na tejto zóne som nastavovala dobu chladenia a rýchlosť prúdenia vzduchu.

Teploty horného a spodného predohrevu, doby trvania zón, ako aj rýchlosť prúdenia ohriateho vzduchu nastavené pre úvodné meranie sú na obrázku 3.16.

Profile Parameters					
	Pre-Heat	Soak	Ramp	Reflow	Cool Down
Top Heater (°C)	151	151	164	186	
Primary Preheater(°C)	164	165	192	213	
Secondary Preheater (°C)	---	---	---	---	
Time (secs)	65	48	24	18	60
Flow (LPM)	25	24	24	24	30
Preheater Position:	0	<input checked="" type="checkbox"/> Use Ramp			

Obr. 3.16 a) Hodnoty nastavené na PACE TF 2700 pre úvodné meranie



	PWI= 286%	Max Rising Slope	Preheat 130-165C	oak Time 140-170C	Reflow Time /183C	Peak Temp					
LH		0.9	-56%	80.4	-59%	78.0	40%	28.6	-165%	188.2	-268%
PH		1.0	-50%	72.0	-76%	70.0	0%	32.7	-142%	194.7	-203%
LD		0.9	-57%	66.6	-87%	64.0	-30%	53.3	-24%	195.6	-194%
PD		0.9	-55%	78.6	-63%	76.1	30%	29.8	-158%	188.4	-266%
S		0.7	-64%	75.5	-69%	71.9	9%	31.2	-150%	186.4	-286%
Delta		0.3		13.9		14.0		24.7		9.2	

Obr. 3.16 b) Teplotný profil 1 – úvodné meranie

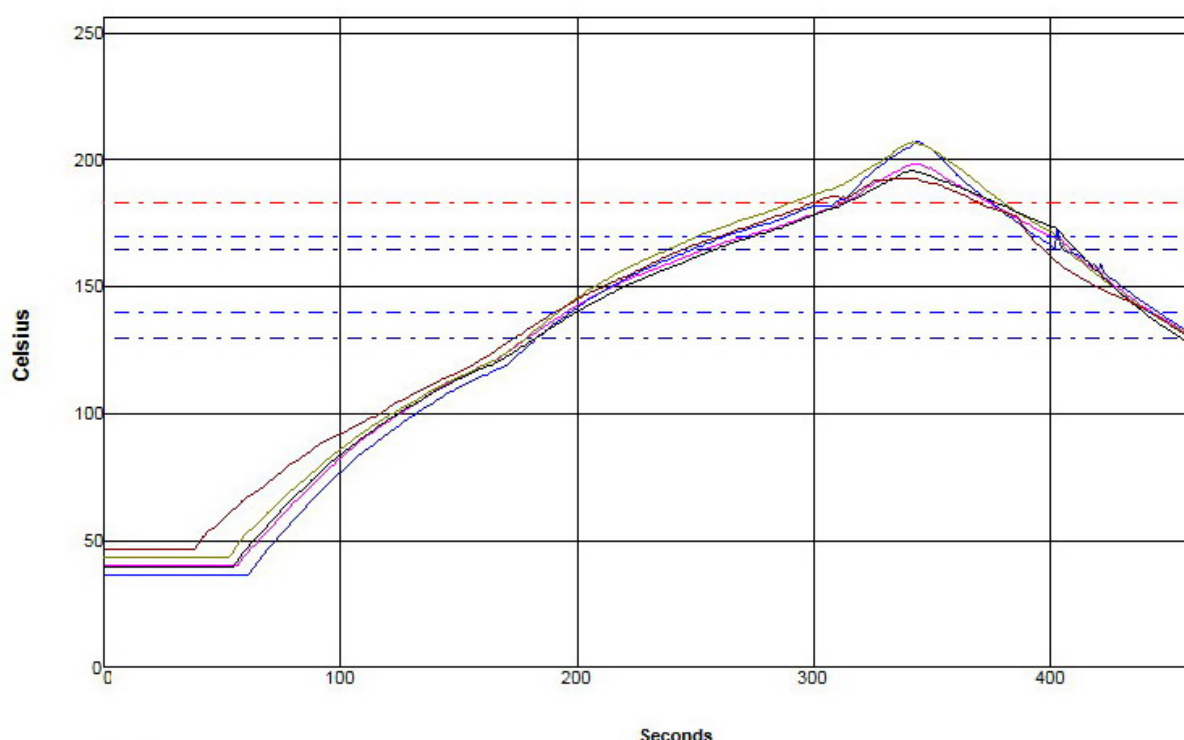
Na obr. 3.16 b) je výsledný teplotný profil merania. Hodnota PWI = 286 %. Znamená to, že reálne zmerané hodnoty neodpovedajú limitám špecifikovaným užívateľom – vid' tab. 3.1. Doby pretavenia sú s výnimkou termočlánku LH príliš krátke – maxi 31,2 s, a vrcholové teploty pre všetky termočlánky nedosahujú spodných limit – maxi 195,6 °C.



Hodnoty nastavené na opravárenskej stanici pre nasledujúce meranie sú uvedené na obr. 3.17 a).

Profile Parameters					
	Pre-Heat	Soak	Ramp	Reflow	Cool Down
Top Heater (°C)	151	151	166	200	
Primary Preheater(°C)	164	165	192	213	
Secondary Preheater (°C)	---	---	---	---	
Time (secs)	65	48	24	30	60
Flow (LPM)	25	24	24	24	30
Preheater Position:	0 <input type="checkbox"/> Use Ramp				

Obr. 3.17 a) Hodnoty nastavené na PACE TF 2700 pre meranie 2



	PWI= 217%	Max Rising Slope	Preheat 130-165C	oak Time 140-170C	Reflow Time /183C	Peak Temp					
LH		1.1	-47%	75.1	-70%	75.2	26%	63.1	32%	198.8	-162%
PH		1.1	-43%	66.2	-88%	65.1	-24%	67.1	55%	207.5	-75%
LD		1.0	-48%	60.4	-99%	58.6	-57%	91.4	194%	207.1	-79%
PD		1.1	-46%	76.2	-68%	75.0	25%	65.2	44%	196.1	-189%
S		1.0	-52%	71.8	-76%	68.6	-7%	71.9	82%	193.3	-217%
Delta		0.2		15.8		16.6		28.3		14.1	

Obr. 3.17 b) Teplotný profil 2 – optimalizácia

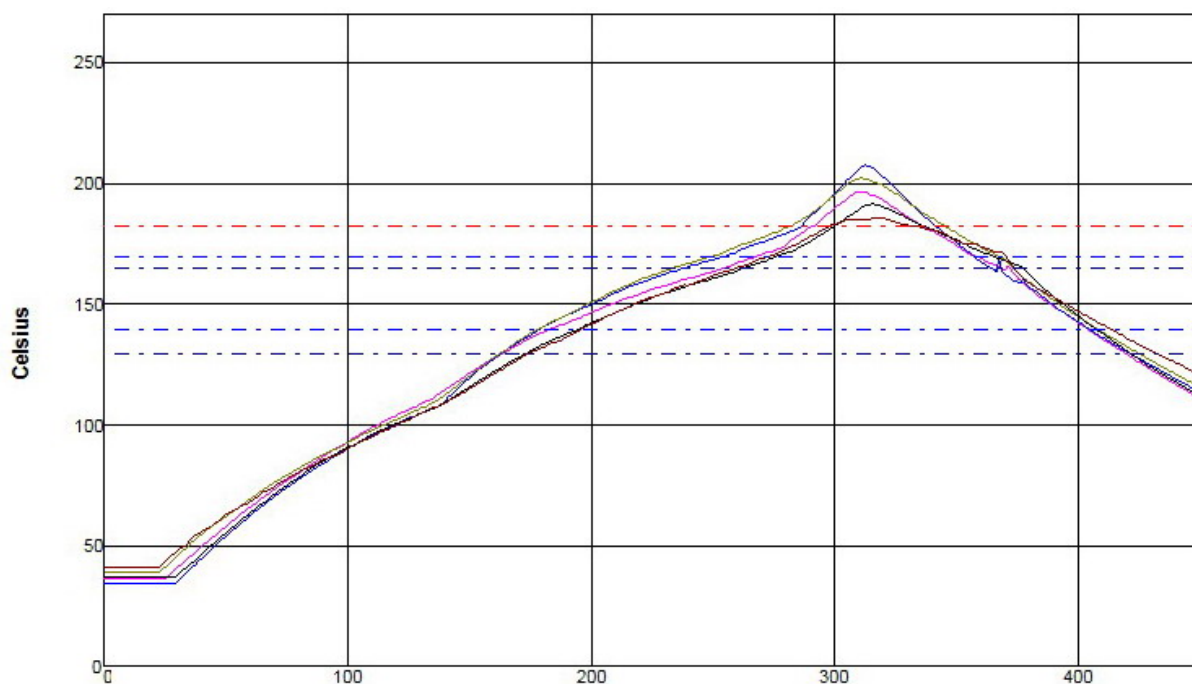
Na obr. 3.17 b) je znázornený teplotný profil merania. Oproti úvodnému meraniu boli pozmenené hodnoty - teploty na rampe, teploty a doba pretavenia. Výsledné PWI = 217 %. To znamená, že namerané teploty na termočláňkoch znova neodpovedajú špecifikácii. Aj keď v prípadoch termočláňkov LH, PH a LD dosiahli pre oblasť pretavenia špecifikovaných limit.

U termočlánku PH dosiahli limit aj pre vrcholovú teplotu. V ostatných prípadoch však namerané hodnoty nedosahujú potrebné limity. Kritická je aj hodnota PWI pre termočlánok LD v oblasti predohrevu, rovná sa 99 %.

Ďalšie meranie prebiehalo pri hodnotách – vid' obr. 3.18 a).

Profile Parameters					
	Pre-Heat	Soak	Ramp	Reflow	Cool Down
Top Heater (°C)	151	151	166	220	
Primary Preheater(°C)	164	165	196	221	
Secondary Preheater (°C)	---	---	---	---	
Time (secs)	65	48	24	30	60
Flow (LPM)	25	24	24	24	30
Preheater Position:	0 <input type="checkbox"/> Use Ramp				

Obr. 3.18 a) Hodnoty nastavené na PACE TF 2700 pre meranie 3



	PWI= 289%	Max Rising Slope	Preheat 130-165C	oak Time 140-170C	Reflow Time /183C	Peak Temp				
LH	0.9	-56%	90.3	-39%	84.4	72%	44.0	-77%	197.0	-180%
PH	1.0	-49%	74.1	-72%	75.5	27%	54.4	-18%	207.9	-71%
LD	0.9	-55%	70.4	-79%	71.3	7%	62.5	29%	202.6	-124%
PD	0.9	-55%	88.8	-42%	81.2	56%	35.3	-127%	191.8	-232%
S	0.8	-59%	84.1	-52%	76.8	34%	30.9	-152%	186.1	-289%
Delta	0.2		19.9		13.1		31.6		21.8	

Obr. 3.18 b) Teplotný profil 3 – optimalizácia

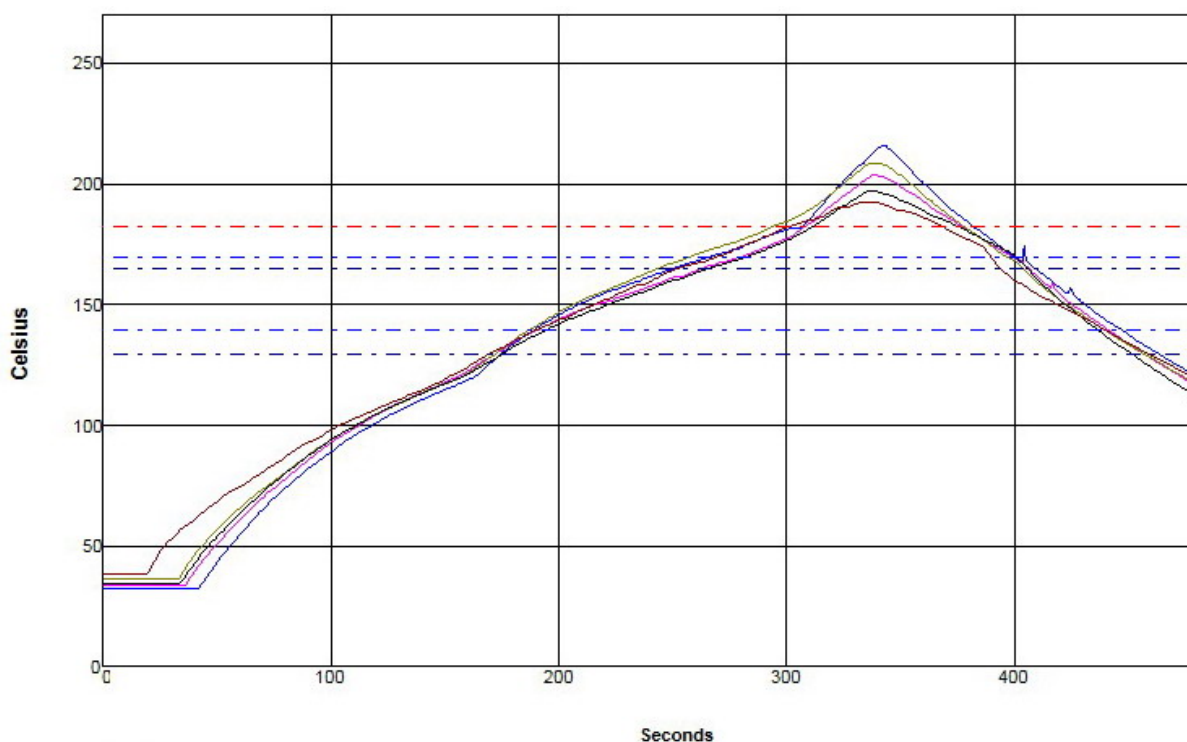
Obrázok 3.18 b) znázorňuje výsledný teplotný profil merania pre hodnoty uvedené na obr. 3.18 a). Oproti predchádzajúcemu nastaveniu boli zvýšené hodnoty – teplota spodného

ohrevu na rampe, teploty spodného i horného ohrevu pretavenia. Hodnota PWI = 289 % - výsledný profil neodpovedá špecifikácii.

Hodnoty nastavené pre nové meranie – obr. 3.19 a).

Profile Parameters					
	Pre-Heat	Soak	Ramp	Reflow	Cool Down
Top Heater (°C)	151	151	168	220	
Primary Preheater(°C)	164	165	198	221	
Secondary Preheater (°C)	---	---	---	---	
Time (secs)	65	48	24	35	60
Flow (LPM)	25	24	24	24	30
Preheater Position:	0 <input checked="" type="checkbox"/> Use Ramp				

Obr. 3.19 a) Hodnoty nastavené na PACE TF 2700 pre meranie 4



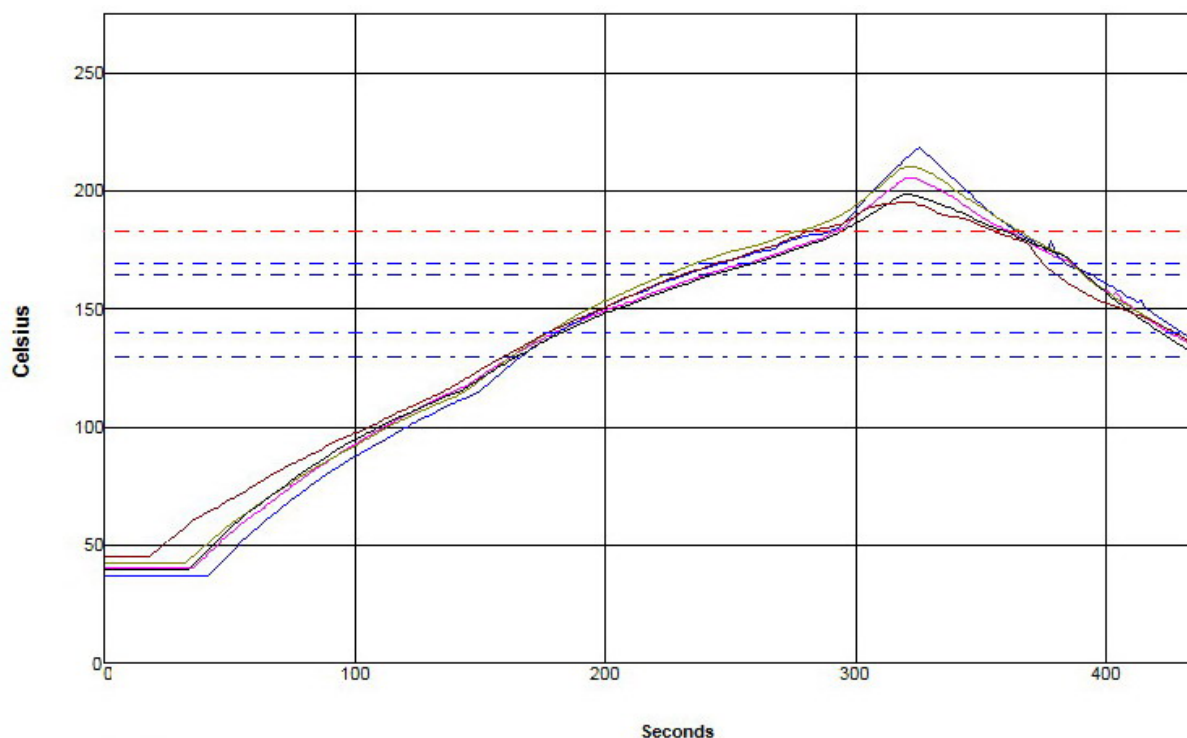
	PWI= 219%	Max Rising Slope	Preheat 130-165C		oak Time 140-170C		Reflow Time /183C		Peak Temp		
LH		1.2	-41%	89.5	-41%	89.6	98%	67.9	59%	204.0	-110%
PH		1.2	-40%	75.4	-69%	76.1	31%	73.7	92%	216.6	16%
LD		1.2	-41%	70.3	-79%	70.1	0%	82.5	143%	209.0	-60%
PD		1.2	-42%	89.1	-42%	86.7	83%	62.0	26%	197.5	-175%
S		1.1	-44%	83.3	-53%	78.5	43%	65.5	46%	193.1	-219%
Delta		0.1		19.2		19.5		20.5		23.5	

Obr. 3.19 b) Teplotný profil 4 – optimalizácia

Hodnoty nastavené pre meranie – obr. 3.20 a).

Profile Parameters					
	Pre-Heat	Soak	Ramp	Reflow	Cool Down
Top Heater (°C)	151	151	168	230	
Primary Preheater(°C)	164	165	200	221	
Secondary Preheater (°C)	---	---	---	---	
Time (secs)	65	48	24	31	60
Flow (LPM)	25	24	24	24	30
Preheater Position:	0 <input type="checkbox"/> Use Ramp				

Obr. 3.20 a) Hodnoty nastavené na PACE TF 2700 pre meranie 5



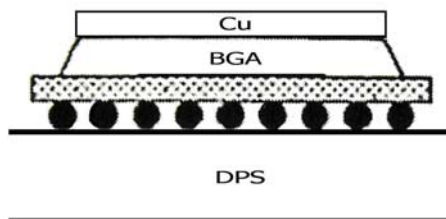
	Max Rising Slope		Preheat 130-165C		oak Time 140-170C		Reflow Time /183C		Peak Temp	
<b>PWI= 192%</b>										
LH	1.0	-52%	77.8	-64%	79.0	45%	70.8	76%	206.0	-90%
PH	1.1	-43%	65.9	-88%	65.9	-20%	75.3	102%	218.4	34%
LD	0.9	-54%	62.0	-96%	60.5	-47%	90.5	188%	210.8	-42%
PD	1.0	-48%	79.3	-61%	78.2	41%	66.3	50%	198.9	-161%
S	0.9	-57%	71.5	-77%	68.8	-6%	75.2	101%	195.8	-192%
Delta	0.3		17.3		18.5		24.2		22.6	

Obr. 3.20 b) Teplotný profil 5 - optimalizácia

Pri zisťovaní optimálneho teplotného profilu pre testovaciu dosku bez záťaže som celkovo opakovala 20 meraní. V tejto práci uvádzam len tie, ktoré sa z hľadiska výsledných hodnôt najviac približujú optimálnym hodnotám PWI.

### 3.4.2 Zátěž Cu

Pri ďalšom meraní som sa zaoberala simuláciou zátáže na PBGA. To som docielila tak, že som umiestnila kúsok medeného plátu na vrchnú stranu puzdra pomocou kaptonovej pásky. Rozmery medeného plátu - (2,4x2,3x1,3) mm a hmotnosť 10 g.



**Obr. 3.20** Ukážka testovanej DPS s upevnenou Cu zátážou

Postup merania teplotného profilu so zátážou je zhodný s postupom merania bez zátáže. Ako pri prvom meraní, tak aj pri tomto som najskôr nastavovala teploty na PACE TF 2700. Rozdielne som však nastavovala hodnoty teplôt jednotlivých zón kvôli predpokladu, že zátáž Cu spôsobí pomalší ohrev puzdra.

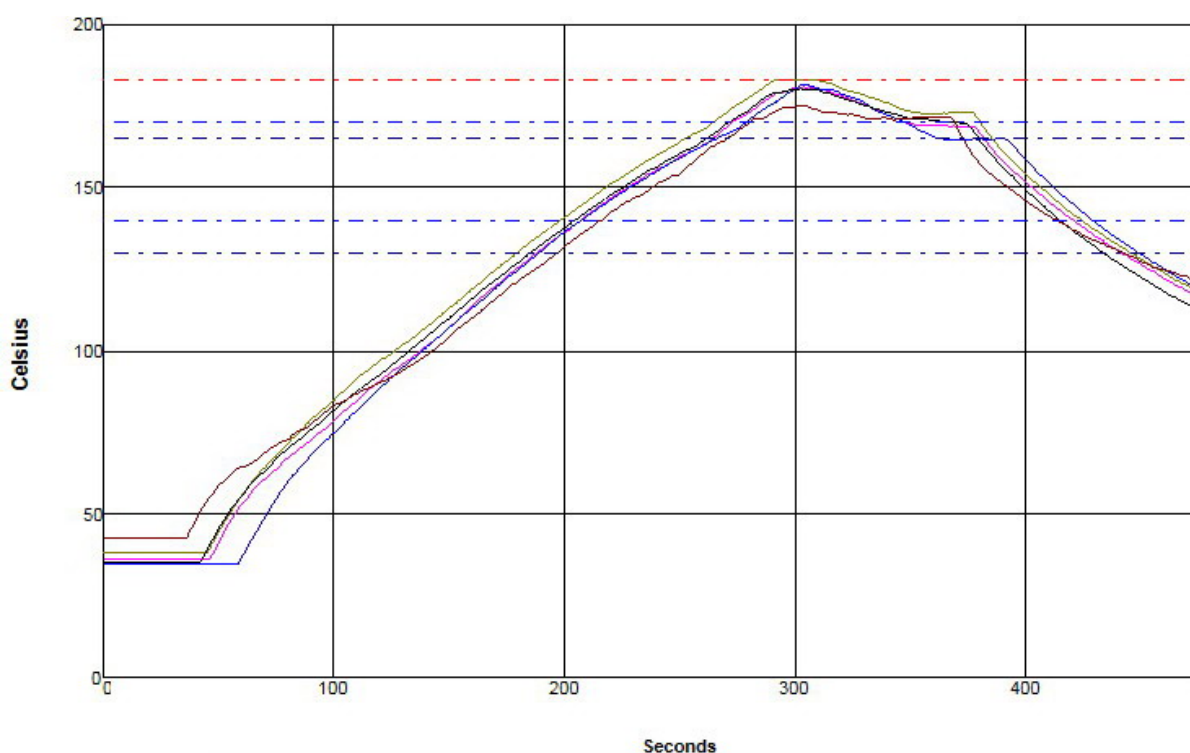
Celkovo som so zátážou opakovala 80 meraní, v nasledujúcej časti uvádzam iba tie, u ktorých sa podarilo dosiahnuť najlepšie výsledné hodnoty PWI.



Na obr. 3.21 a) sú teploty, doby trvania a rýchlosti prúdenia ohriateho vzduchu pre úvodné meranie.

Profile Parameters					
	Pre-Heat	Soak	Ramp	Reflow	Cool Down
Top Heater (°C)	161	160	174	208	
Primary Preheater(°C)	174	175	202	221	
Secondary Preheater (°C)	---	---	---	---	
Time (secs)	65	44	24	21	60
Flow (LPM)	25	24	24	24	30
Preheater Position:	0 <input checked="" type="checkbox"/> Use Ramp				

Obr. 3.21 a) Hodnoty nastavené na PACE TF 2700 pre meranie Cu 1



	Max Rising Slope		Preheat 130-165C		oak Time 140-170C	Reflow Time /183C	Peak Temp			
<b>PWI= 399%</b>										
LH	1.1	-46%	76.4	-67%	65.8	-21%	0.0	-329%	181.0	-340%
PH	1.2	-41%	77.1	-66%	71.4	7%	0.0	-329%	181.8	-332%
LD	1.1	-44%	73.4	-73%	66.7	-17%	12.7	-256%	183.4	-316%
PD	1.1	-44%	76.6	-67%	66.9	-16%	0.0	-329%	180.4	-346%
S	1.0	-50%	73.6	-73%	64.6	-27%	0.0	-329%	175.1	-399%
Delta	0.2		3.7		6.8		12.7		8.4	

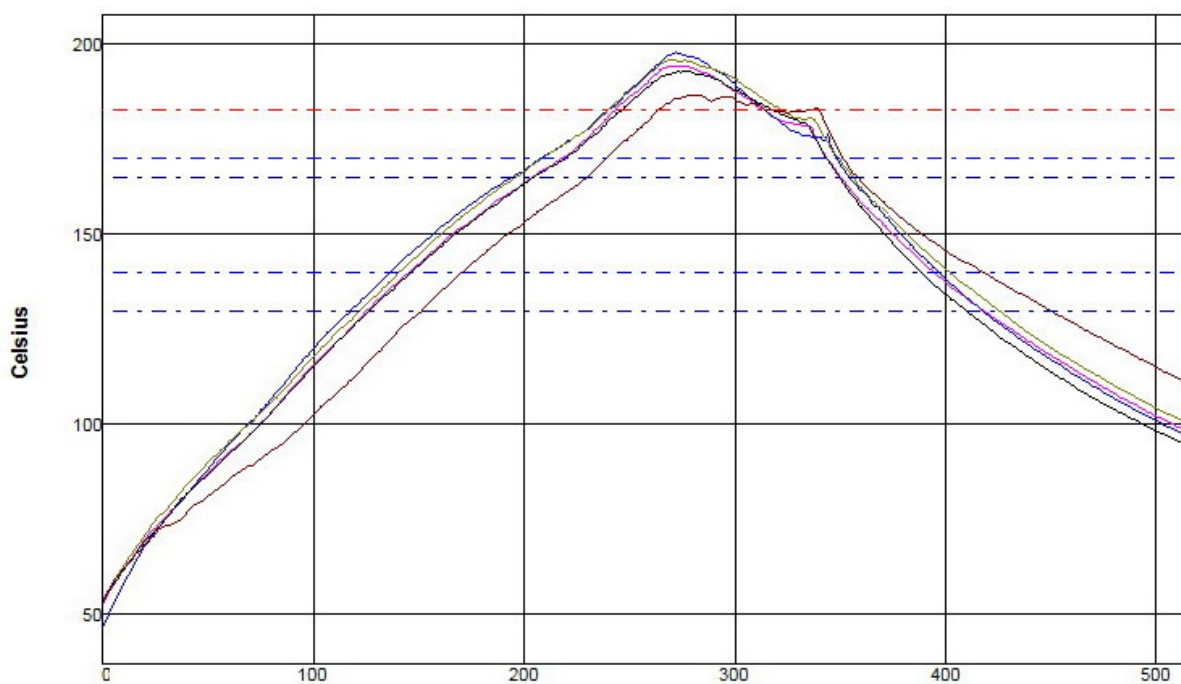
Obr. 3.21 b) Teplotný profil Cu 1 – úvodné meranie

Výsledný teplotný profil úvodného merania udáva hodnotu PWI = 399 %. Ako je vidno na obrázku, neboli dosiahnuté limity pre doby pretavenia ani pre vrcholové teploty, to pre žiaden z piatich termočlánkov.

V ďalšom prípade som zvýšila teplotu horného ohrevu v zóne pretavenia, časy pre zóny zmáčania a rampy a znížila čas zóny pretavenia. Vid' obr. 3.22 a).

Profile Parameters					
	Pre-Heat	Soak	Ramp	Reflow	Cool Down
Top Heater (°C)	161	160	174	226	
Primary Preheater(°C)	174	175	202	221	
Secondary Preheater (°C)	---	---	---	---	
Time (secs)	65	52	32	38	60
Flow (LPM)	25	24	24	24	30
Preheater Position:	0		<input checked="" type="checkbox"/> Use Ramp		

Obr. 3.22 a) Hodnoty nastavené na PACE TF 2700 pre meranie Cu 2



	Seconds									
PWI= 281%	Max Rising Slope	Preheat 130-165C		oak Time 140-170C		Reflow Time /183C	Peak Temp			
LH	1.1	-44%	78.0	-64%	72.4	12%	70.0	72%	194.6	-204%
PH	1.3	-37%	76.2	-68%	70.9	5%	74.3	96%	198.1	-169%
LD	1.2	-38%	73.9	-72%	67.7	-12%	81.3	136%	196.0	-190%
PD	1.0	-52%	77.6	-65%	73.1	15%	70.5	74%	193.1	-219%
S	0.7	-63%	78.1	-64%	68.4	-8%	53.9	-20%	186.9	-281%
Delta	0.5		4.3		5.4		27.4		11.2	

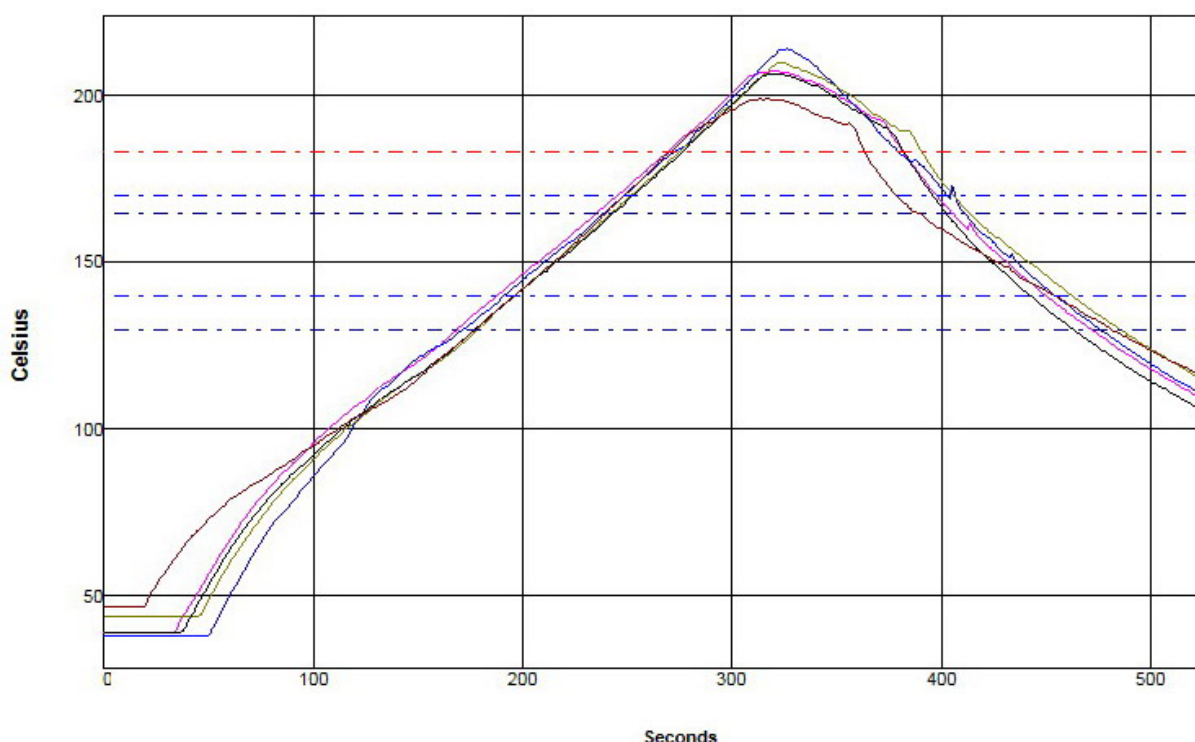
Obr. 3.22 b) Teplotný profil Cu 2 – optimalizácia

V prípade merania z obrázku 3.22 b) bola výsledná PWI = 281 %, dosiahla som teda lepších hodnôt ako pri predchádzajúcom meraní. Podarilo sa dosiahnuť limity pre doby pretavenia pre štyri termočlánky – okrem termočlánku LD. Pre oblasť vrcholových teplôt však špecifikované hodnoty nedosiahol žiadny termočlánok.

Pre ďalšie merania som rozhodla, že zmením výšku spodného ohrevu na hodnotu 0,25 palca (0,635 cm) z pôvodných 0 palcov.

Profile Parameters					
	Pre-Heat	Soak	Ramp	Reflow	Cool Down
Top Heater (°C)	161	180	218	235	
Primary Preheater(°C)	174	187	217	221	
Secondary Preheater (°C)	---	---	---	---	
Time (secs)	65	48	24	20	60
Flow (LPM)	25	24	24	24	30
Preheater Position:	0.25		<input checked="" type="checkbox"/> Use Ramp		

Obr. 3.23 a) Hodnoty nastavené na PACE TF 2700 pre meranie Cu 3



	PWI= 338%	Max Rising Slope	Preheat 130-165C	oak Time 140-170C	Reflow Time /183C	Peak Temp					
LH		1.1	-47%	66.6	-87%	57.4	-63%	112.6	315%	207.5	-75%
PH		1.2	-42%	67.3	-85%	57.7	-61%	107.6	286%	214.1	-9%
LD		1.1	-47%	63.6	-93%	55.1	-74%	116.7	338%	210.1	-49%
PD		1.1	-45%	66.5	-87%	56.2	-69%	106.1	278%	206.6	-84%
S		1.0	-52%	62.3	-95%	52.6	-87%	93.4	205%	199.2	-158%
Delta		0.2		5.0		5.1		23.3		15.0	

Obr. 3.23 b) Teplotný profil Cu 3 – optimalizácia

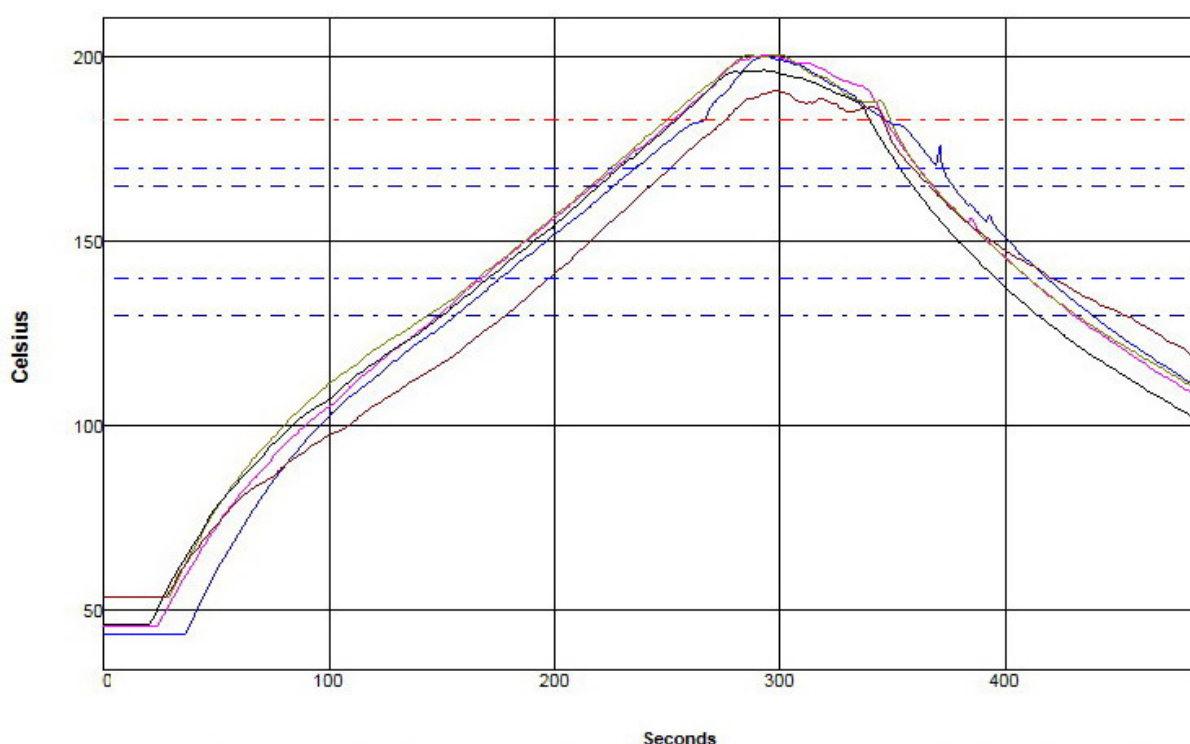
Pri nastavených hodnotách podľa obr. 3.23 a) a pri zdvihnutom spodnom ohreve sa podarilo dosiahnuť limit vrcholových teplôt pre štyri termočlánky z piatich. Najlepšia dosiahnutá hodnota PWI však bola 338 % a to pre oblasť doby pretavenia, kde všetky termočlánky presahovali limity špecifikované pre dobu pretavenia.



Ako ukazuje obr. 3.24 a), znova som zmenila výšku spodného ohrevu, a to na hodnotu 0,5 palca (1,27 cm).

Profile Parameters					
	Pre-Heat	Soak	Ramp	Reflow	Cool Down
Top Heater (°C)	161	170	225	235	
Primary Preheater(°C)	174	190	217	221	
Secondary Preheater (°C)	---	---	---	---	
Time (secs)	65	48	10	13	60
Flow (LPM)	25	24	24	24	30
Preheater Position:	0.5 <input checked="" type="checkbox"/> Use Ramp				

Obr. 3.24 a) Hodnoty nastavené na PACE TF 2700 pre meranie Cu 4



PWI= 241%	Max Rising Slope	Preheat 130-165C	oak Time 140-170C	Reflow Time /183C	Peak Temp					
LH	1.1	-47%	67.9	-84%	59.8	-51%	93.8	208%	200.7	-143%
PH	1.2	-41%	69.9	-80%	59.8	-51%	80.1	129%	200.2	-148%
LD	1.2	-42%	71.4	-77%	58.6	-57%	99.3	239%	200.8	-142%
PD	1.1	-44%	69.1	-82%	58.4	-58%	86.3	165%	196.6	-184%
S	0.9	-55%	64.4	-91%	53.9	-81%	70.3	73%	190.9	-241%
Delta	0.3		6.9		6.0		29.1		9.9	

Obr. 3.24 b) Teplotný profil Cu 4 – optimalizácia

Najlepší dosiahnutý výsledok meraní pri nastavení spodného ohrevu na výšku 0,5 palca je na obr. 3.24 b). Dosiahnutá hodnota PWI = 241 %, avšak štyri termočlánky prekročili časové limity pretavenia a všetkých päť nedosiahlo spodných hraníc vrcholových teplôt.

## 4 Diskusia k experimentálnej časti

V experimentálnej časti práce som navrhovala metódu pre meranie a vyhodnocovanie teplotných profilov pri procese pretavenia u testovaného vzorku, ktorým bolo puzdro Plastic Ball Grid Array (PBGA) osadené na doske plošných spojov materiálu FR4.

Na testovanie som použila tzv. dummy PBGA, teda puzdro bez integrovaných vnútorných obvodov. To som pomocou opravárenskej stanice pripojila ku skúšobnej doske, ktorá bola z materiálu FR4, čo je vrstvený plátovaný materiál na bázy epoxidu a sklennej tkaniny.

Pre vlastné meranie teploty som zvolila termočlánok typu K, kedy som zohľadňovala jeho merací rozsah - zaznamenáva teploty od  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Keďže som uvažovala o upevnení v mieste spájkovacej guličky, zvolila som priemer  $\varnothing$ . Na testovanom vzorku som zvolila päť meracích bodov - ľavý horný, ľavý dolný, pravý horný a pravý dolný okraj puzdra a stred. Rozmiestnenie termočlánkov som volila tak, aby bolo možné sledovať priebehy teploty v kriticky namáhaných spojoch puzdra PBGA pri procese pretavenia.

V prípade fixácie termočlánkov som použila dve metódy. fixácie. Ako prvú metódu som volila upevnenie pomocou elektricky nevodivého vytvrdzovaného lepidla pre SMT technológiu. Použila som nevodivé lepidlo SMT-Kleber, Heraeus, typu PD 86002. Použitím tejto metódy sa podarilo vytvoriť pevné spojenie termočlánku s okolím v meranom bode, kedy bolo zaručené homogénne vedenie tepla prostredníctvom lepidla. Ako druhú metódu som volila upevnenie termočlánku pomocou kaptonovej pásky, ktorá bola vhodná pre upevnenie vzduchového termočlánku, ktorý bol jednoducho prilepený zo spodku testovacej dosky a ľahko manipulovateľný.

Ďalšou problematikou, ktorú som riešila v rámci tejto práce bola metodika merania teplotných profilov behom pretavovacieho procesu skúšobného BGA puzdra. Pre vlastné meranie som použila testovacie zariadenie SlimKic 2000 a k nemu priložený program pre zaznamenanie a vyhodnotenie teplotných profilov. Pri voľbe metodiky merania som sa opierala o bežný postup udávaný v odbornej literatúre. Jednotlivé merania som vyhodnocovala pomocou štatistického nástroja za použitia metódy výpočtu Process Window Index (PWI).

Pri simulácii vplyvu rozdielnych tepelných kapacít dosky plošných spojov a PBGA puzdra na výsledný pretavovací profil som sa zaoberala meraním teplotných profilov pre dva prípady. V prvom prípade som merala profil skúšobnej dosky bez záťaže.

Predpokladala som priebeh teplotného profilu, ktorý je bežne používaným pri vyhodnocovaní a optimalizácii pre pretavovanie v peci - RTS. Keďže v rámci mojej práce išlo o meranie teplotného profilu pre pretavovanie pomocou vyhriateho nástroja, sledovala som jednotlivé zóny v poradí - predohrev, zmáčanie, rampa a pretavenie. V tomto poradí som nastavovala hodnoty na PACE ThermoFlo 2700. Pre nesprávny proces spájkovania - kedy nedochádzalo ku dostatočnému prehriatiu materiálu, a pre prípady, kedy teploty v oblasti meracieho spoja boli pri spájkovacom procese na nízkej teplote alebo bola doba spájkovania príliš krátka, boli výsledné hodnoty štatistického výpočtu  $PWI = 286 \%$ . V tomto meraní vykazoval hodnotu  $PWI = 24 \%$  jeden termočlánok z piatich, a to pre štatistiku času pretavenia. V takom prípade som na opravárenskej stanici pre ďalšie merania zmenila teplotné a časové intervaly, a to pre zóny rampa a pretavenie. Pre toto meranie sa podarilo dosiahnuť najlepšie  $PWI = 217 \%$ . Avšak v oblasti predohrevu sa  $PWI$  hodnota jedného z piatich termočlánkov priblížila kritickej hodnote  $99 \%$ .

Pri ďalšom nastavovaní hodnôt teplôt a časových intervalov pre zóny rampa a pretavenie boli dosiahnuté hodnoty  $PWI = (298, 219, 192) \%$ .

Pri nastavovaní parametrov pre jednotlivé zóny je potrebné si uvedomiť, že zmena jedného parametru má vplyv na priebeh teplotného profilu ostatných zón a tým aj v komplexnom merítku na celkový výsledný profil.

V postupe optimalizácie teplotného profilu na skúšobnej doske bez záťaže sa ako najvhodnejší zo všetkých uvedených javil profil číslo 4. Aj napriek tomu, že hodnoty  $PWI$  niektorých termočlánkov neodpovedali špecifikovaným limitám, bol tento teplotný profil v porovnaní s ostatnými najbližšie k hodnotám, ktoré v rámci pretavovacieho procesu zaručia kvalitné a spoľahlivé prepojenie puzdra PBGA a dosky.

V druhej časti danej úlohy som merala teplotný profil skúšobnej dosky so simulovanou záťažou. Použila som medený materiál, ktorý je charakteristický pomerne vysokou tepelnou vodivosťou a rozťažnosťou. Voľba záťaže bola podmienená aj možným využitím medeného materiálu ako prvku chladenia, prípadne pre simuláciu väčšej zástavbovej výšky konštrukcie PBGA.

Pred začiatkom merania som vychádzala z predpokladu, že záťaž ovplyvní výsledný teplotný profil, čo sa odzrkadlí na rýchlosti a maximálnych teplotách ohrevu dosky.

Keďže sa predpoklad potvrdil, pokúšala som sa doceliť optimálny teplotný profil podobne ako pri meraní bez záťaže. Na opravárenskej stanici som nastavovala doby trvania a teplotné intervaly pre zóny zmáčania, rampa a pretavenie. Pre oblasti predohrevu a zmáčania som nastavila hodnoty o cca 10 °C vyššie, aby sa doska pred samotným procesom pretavenia dostatočne prehriala.

Pri ďalších meraniach som menila taktiež výšku polohovateľného spodného IR ohrevu z pôvodnej výšky 0 palcov, na 0,25 palca a 0,5 palca.

Zisťovanie teplotného profilu pre meranie so záťažou, ktorý by sa blížil optimálnym hodnotám bolo práve v dôsledku tepelnej kapacity použitého materiálu pomerne náročné. Pre príliš nízke teploty nastavené na opravárenskej stanici sa testovacia doska a spoje dostatočne neprehriali. V takom prípade sa výsledné hodnoty pre oblasti pretavovacieho času a vrcholových hodnôt pohybovali nízko pod špecifikovanými hodnotami - PWI = 399 %. Pridaním teplôt v oblasti zmáčania a pretavenia sa podarilo dosiahnuť optimálnych hodnôt času pretavenia pre štyri termočlánky z piatich - okrem stredného termočlánku - PWI = 136 %, avšak hodnoty vrcholových teplôt opäť dosiahnuté neboli - PWI = 281 %. V prípadoch zmeny výšky spodného ohrevu boli najlepšie dosiahnuté hodnoty PWI nasledovné: výška ohrevu 0,25 palca - PWI = 338 %; výška ohrevu 0,5 palca - PWI = 241 %.

Pri meraní som záťažou som ďalej zistila, že doceliť rovnomerný ohrev dosky ako celku bolo obtiažne aj z dôvodu toho, že spoje na okrajoch puzdra osadeného na testovacej doske sa vyhrievali rýchlejšie ako spoj uprostred.

Požadovaný optimálny proces by bolo možné dosiahnuť a presne tepelne vymedziť ďalším testovaním. Bolo by potrebné vytvoriť ucelený postup nastavovania jednotlivých teplotných zón. To tak, že by sa opakoval určitý počet meraní so zmenenou hodnotou času prípadne teploty konkrétnej zóny a sledoval by sa vplyv tohto nastavenia na výsledný krivku. Tento postup by sa mohol opakovať pre každú zónu zvlášť. Sledovalo by sa, pri akých hodnotách nastavených na opravárenskej stanici sú reálne hodnoty teplôt namerané na všetkých termočlánoch v oblasti pod limitou 100 %. Optimálny teplotný profil by teda vo výsledku vykazoval hodnoty všetkých termočlánkov  $PWI \leq 80 \%$ , v ideálnom prípade blížiac sa 0 %.

## 5 Záver

Problematika presného zaznamenania, vyhodnocovania a následnej optimalizácie teplotného profilu je v oblasti elektrotechnickej výroby stále aktuálna. Hlavne pre návrh a použitie súčiastok, ktoré sa držia trendu miniaturizácie je dôležité, aby pri navrhovaní postupu merania a pri nastavovaní teplotného procesu bolo docielené kvalitné prepojenie súčiastky s vodivými cestami na nosnom materiále a tým zaistiť čo najlepšiu akosť a životnosť spájkovaného spoja, v komplexnom merítke celého elektronického systému.

Cieľom práce bolo navrhnutie metódy pre meranie a vyhodnocovanie teplotných profilov pri procese pretavenia u testovaného vzorku, ktorým bolo dummy PBGA puzdro osadené na doske plošných spojov materiálu FR4.

V úvode bolo potrebné navrhnuť vhodnú metódu pre fixáciu termočlánku typu K na testovacej štruktúre. Pri výbere termočlánku som zohľadnila jeho merací rozsah. Na testovanom vzorku bolo zvolených päť meracích bodov s takým rozmiestnením, aby termočlánky zaznamenávali priebehy teploty v kriticky namáhaných spojoch puzdra PBGA pri procese pretavenia.

Pre meranie boli použité dve metódy fixácie termočlánkov - lepidlom a kaptonovou páskou. Z teoretického porovnania metód vyplynulo, že termočlánky v okolí meraného bodu upevnené na pevno pomocou lepidla mali lepšie podmienky z hľadiska homogénneho prenosu tepla. V prípade poruchy však nebolo možné takýto termočlánok vymeniť bez jeho poškodenia. Z tohto dôvodu sa javí lepšia metóda upevnenia pomocou kaptonovej pásky, kedy je možné napr. v prípade poruchy termočlánku jeho jednoduchá výmena alebo zmena miesta meracieho bodu bez aplikácie ďalšieho termočlánku. Nevýhodou naopak môže byť nehomogénne spojenie meracieho bodu a termočlánku, v prípade nešetrnej manipulácie odlepenie termočlánku a ovplyvnenie výsledkov merania. Voľba použitia vhodného termočlánku ako aj samotnej metódy upevnenia sa však odvíja od predpokladaného miesta merania.

Ďalšou problematikou riešenou v rámci tejto práce bola metodika merania teplotných profilov behom pretavovacieho procesu skúšobného BGA puzdra. Pre vlastné meranie bolo použité testovacie zariadenie SlimKic 2000 a k nemu priložený program pre zaznamenanie a vyhodnotenie teplotných profilov. Pri voľbe metodiky sa vychádzalo z bežného postupu

udávaného v odbornej literatúre. Jednotlivé merania boli vyhodnocované štatistickým nástrojom za použitia metódy výpočtu Process Window Index (PWI).

Pri simulácii vplyvu rozdielnych tepelných kapacít dosky plošných spojov a PBGA puzdra na výsledný pretavovací profil boli sledované a merané teplotné profily pre dva prípady. V prvom prípade išlo o profil skúšobnej dosky bez záťaže, v druhom prípade bola simulovaná záťaž - priložený medený materiál. Boli dosiahnuté zaujímavé a inšpiratívne výsledky, taktiež boli nastienené ďalšie možnosti v postupe optimalizácie a metodike merania teplotného profilu - bližšie analyzované v kapitole 4 - diskuzia.

Z hľadiska technického prínosu je možné prácu považovať za teoreticko-praktické východisko pre ďalšie experimenty spojené s predikciou teplotného profilu. Jednalo by sa o analytické vyhodnocovanie vplyvu rozdielnych tepelných kapacít súčiastky a puzdra z hľadiska zmien PWI v jednotlivých častiach procesu spájkovania/odpájkovania. Ako zaujímavé sa javí i rozšírenie softveru Slim Kic 2000 o nástroj Auto Focus, ktorý by uľahčil vyhodnotenie PWI.

## 6 Zoznam použitých skratiek

BGA	Ball Grid Array
DPS	Doska plošných spojov
FR4	vrstvený materiál - sklená tkanina a epoxid v samozhášavom prevedení
HMP	High Melting Point
IMC	Intermetallic Zone
IR	Infrared
LD	Ľavý dolný - označenie termočlánku
LFS	Lead-free-solder
LH	Ľavý horný - označenie termočlánku
PBGA	Plastic Ball Grid Array
PH	Pravý horný - označenie termočlánku
PD	Pravý dolný - označenie termočlánku
PWI	Process Window Index
RAM	Random Access Memory
RSS	Ramp-Soak-Spike
RTS	Ramp-To-Spike
S	Stredný - označenie termočlánku
SK 2000	Slim Kic 2000
SMT	Surface Mount Technology
SnPb	spájkovacia zliatina s obsahom cínu a olova
Sn63Pb37	spájkovacia zliatina s obsahom 63 % cínu a 37 % olova
TF 2700	Thermo Flo 2700

## 7 Použitá literatura – doplniť roky u literatúry

- [1] STARÝ, J. *Plošné spoje a povrchová montáž*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 208 s.
- [2] STARÝ, J. *Bezolovnaté pájení – materiálová a procesní kompatibilita v interní/redukční atmosféře*, skrátená verzia Ph.D. práce, Brno, 2005, ISBN-80-214-3055-9 (brož.); sv. 343.
- [3] SZENDIUCH, I. *Moderní elektronika, bezolovnaté pájení a směrnice EU*, 10 strán. [online], [cit.: 2008-3-28]  
Dostupné na : <<http://www.welding.cz/pajky/dok06/Moderni.pdf>>.
- [4] DRLÍK, M. *Použití bezolovnatých pájecích slitin*. [online], [cit.: 2007-4-28]  
Dostupné na: <<http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/soubory/bezolovo.pdf>>.
- [5] SZENDIUCH, I. *Multimediální výukový systém*. [online], [cit.: 2008-5-27 ]  
Dostupné na: <<http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice/>>.
- [6] KOLEŇÁK, R., TURŇA, M. *Spájkovanie mäkkými bezolovnatým spájkami*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2006, ISBN-80-227-2390-8 (brož.); 150 s.
- [7] SZENDIUCH, I. a kolektiv: *Technologie elektronických obvodů a systémů*. Nakladatelstvo VUTIUM, Vysoké učení technické v Brně, 2002, ISBN-80-214-2072-3; 239 s.
- [8] ČESKÝ VÝBOR SVÁŘEČSKÉ SPOLEČNOSTI ČSVTS, *Pájení v elektronice*, Dům techniky ČSVTS Pardubice, 1990, ISBN-80-02-00294-6 (Brož.); 166s.
- [9] [online], [cit.: 2007-5-15]  
Dostupné na stránkach firmy Practical: <[www.practical.com](http://www.practical.com)>.
- [10] *Úvod do termočlánků*, [online], [cit.: 2008-5-20].  
Dostupné na: <<http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>>.
- [11] STARÝ, J. *Pájení-pracovní verze 405*, Brno 2007.
- [12] STARÝ, J., ZATLOUKAL, M., STEJSKAL, P. *Montážní a propojovací technologie, pracovní verze 80509*, Brno, 2008, 237 s.
- [13] TERPÁK, J., DORČÁK, E. *Procesy prenosu*. Technická univerzita v Košiciach, 2001, ISBN-80-7099-733-8.
- [14] *The Process Window Index: A Method for Quantifying Thermal Profile Performance*, Copyright © KIC Thermal Profiling, 3s.
- [15] *Termoelektrické snímače teploty*, [online], [cit.: 2008-5-20].  
Dostupné na: <<http://www-dt.fme.vutbr.cz/measure/Senzor/CI-TerCI.htm>>.
- [16] *Operation and Maintenance Manual - TF 1700 and TF 2700 BGA Rework Station- Operation and Maintenance (man. num. 5050-0554)*, Poskytnuté firmou T.A.M Europe, s.r.o.



