

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2021

Jakub Dundr



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

**DEMONTÁŽ A MONTÁŽ BGA POUZDER NA  
ZAŘÍZENÍCH S NUCENOU KONVEKČÍ**

BGA PACKAGES - DISASSEMBLY AND ASSEMBLY WITH FORCED CONVECTION HEAT  
TRANSFER EQUIPMENTS APPLICATION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR THESIS

**AUTORPRÁCE**

AUTHOR

Jakub Dundr

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Jakub Dundr

**ID:** 211224

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

**Demontáž a montáž BGA pouzder na zařízeních s nucenou konvekcí**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Prostudujte principy dvou opravárenských stanic pracujících s nucenou konvekcí a zpracujte přednosti a nevýhody těchto systémů. Navrhněte metodiku zkoušek pro optimalizaci teplotních profilů a porovnání homogenity ohřevu. Zpracujte dosažené výsledky.

**Termín zadání:** 21.9.2020

**Termín odevzdání** 3.6.2021

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

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se soustředí na vysvětlení problematiky pouzdření, konstrukci pouzder BGA a následných opravárenských procesů, které lze pro tato pouzdra zvolit. Práce dále zahrnuje vysvětlení fyzikálních principů přenosu tepla. V neposlední řadě jsou v této práci srovnány konkrétní stanice pro provádění oprav BGA pouzder a některé jejich parametry.

## **Klíčová slova**

Pouzďení, přenos tepla, pouzdra BGA, oprava BGA, opravárenské stanice

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on problematics of packaging, BGA package construction and following rework procedures that can be chosen for this packages. This thesis further includes explanation of physical principles of heat transfer. Last but not least particular rework stations for BGA rework with their specifications are being compared in this bachelor thesis.

## **Keywords**

Packaging, heat transfer, BGA packages, BGA rework, rework stations

## **Bibliografická citace:**

DUNDR, Jakub. *Demontáž a montáž BGA pouzder na zařízeních s nucenou konvekcí* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134630>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Starý.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Jakub Dundr*

**VUT ID studenta:** *211224*

**Typ práce:** *Bakalářská práce*

**Akademický rok:** *2020/21*

**Téma závěrečné práce:** *Demontáž a montáž BGA pouzder na zařízeních  
s nucenou konvekcí*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 3. 6. 2021

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

*Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále pak vedení firmy ABE.TEC a jejím zaměstnancům za umožnění realizace praktické části této práce.*

V Brně dne: **3. 6. 2021**

.....  
podpis autora

# Obsah

<b>1. POUZDŘENÍ A DRUHY POUZDER</b> .....	<b>12</b>
1.1 ZÁKLADNÍ POPIS A VLASTNOSTI.....	12
1.1.1 Pouzdra THP (THT).....	12
1.1.2 Pouzdra SMP (SMT).....	13
1.1.3 Pouzdra SMP jako nosiče čipů (chip carriers).....	14
1.1.4 Pouzdra PGA.....	15
1.1.5 Pouzdra Flat Package.....	16
1.1.6 Pouzdra CSP.....	17
1.1.7 Čipy bez pouzder.....	18
1.1.8 Pouzdra diskretních součástek.....	18
1.2 POUZDRA BGA.....	20
1.2.1 Základní charakteristika:.....	20
1.2.2 Konstrukce pouzder BGA a jejich druhy.....	21
1.2.3 Pouzdra P-BGA.....	22
1.2.4 Pouzdra C-BGA.....	23
1.2.5 Pouzdra T-BGA.....	24
1.2.6 Pouzdra $\mu$ -BGA.....	25
1.3 VLIV TEPLoty NA ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY A ZAŘÍZENÍ.....	27
1.3.1 Základní veličiny.....	27
1.3.2 Teplo a jeho přenos.....	28
1.3.3 Přenos tepla vedením.....	28
1.3.4 Přenos tepla prouděním.....	29
1.3.5 Přenos tepla zářením.....	30
1.4 OPRAVÁRENSKÉ METODY PRO POUZDRA BGA.....	31
1.4.1 Předehřev.....	32
1.4.2 Výměna pouzdra.....	32
1.4.3 Příprava ploch pro osazení nového BGA.....	32
1.4.4 Aplikace pájecí pasty.....	32
1.4.5 Výměna pouzdra BGA.....	33
1.4.6 Čištění.....	33
1.4.7 Inspekce.....	33
1.5 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH OPRAVÁRENSKÝCH STANIC.....	33
1.5.1 Stanice Martin Expert 10.6 hxx.....	33
1.5.2 Stanice Hakko FR-811.....	35
1.6 MĚŘICÍ PRACOVIŠTĚ A VYBAVENÍ.....	37
1.6.1 Termočlánky použité pro měření teplotních profilů.....	37
1.6.2 Šestikanálový profiloměr.....	40
<b>2. PRAKTICKÉ MĚŘENÍ TEPLoTNÍCH PROFILŮ</b> .....	<b>41</b>
2.1 TYPICKÝ PRŮBĚH PÁJECÍCH PROFILŮ A JEJICH PARAMETRY.....	41
2.1.1 Lineární pájecí profil RTS.....	41
2.1.2 Sedlový teplotní profil RSS.....	41
2.1.3 Význam jednotlivých zón a technologicky významné parametry.....	42
2.2 MĚŘENÍ HOMOGENITY OHŘEVU POUŽITÝCH STANIC.....	43
2.3 MĚŘENÍ A POROVNÁVÁNÍ TEPLoTNÍCH PROFILŮ.....	46
2.3.1 Upevnění termočlánků na testovacím přípravku.....	48



2.3.2	<i>Data naměřená na stanici Martin</i> .....	49
2.3.3	<i>Vyhodnocení teplotního profilu v oblasti pouzdra BGA – stanice Martin</i> .....	51
2.3.4	<i>Vyhodnocení z pohledu okolních komponent – stanice Martin</i> .....	52
2.3.5	<i>Data naměřená na stanici Hakko</i> .....	53
2.3.6	<i>Vyhodnocení teplotního profilu v oblasti pouzdra BGA – stanice Hakko</i> .....	55
2.3.7	<i>Vyhodnocení z pohledu okolních komponent – stanice Hakko</i> .....	55
2.3.8	<i>Diskuse dosažených výsledků</i> .....	56
2.4	<b>SHRNUTÍ POUŽITÉ METODIKY MĚŘENÍ A VYHODNOCOVÁNÍ</b> .....	58
2.4.1	<i>Metodika měření</i> .....	58
2.4.2	<i>Náměty pro případné navazující práce</i> .....	59
<b>3.</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>60</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>62</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1: Rozmístění vývodů pouzder BGA [4] .....	21
1.2: Možnosti provedení vývodů pouzder BGA [4].....	22
1.3: Pouzdro P-BGA s kontaktováním čipu metodou wire-bonding [4] .....	23
1.4: Pouzdro C-BGA s kontaktováním čipu metodou flip-chip [7] .....	24
1.5: Pouzdro T-BGA s kontaktováním čipu metodou flip-chip [7] .....	25
1.6: Pouzdro $\mu$ -BGA firmy TESSERA [4] .....	26
1.7: Princip absolutně černého tělesa [6] .....	30
1.8: Princip výměny pouzdra BGA [8] .....	32
1.9: Stanice Martin Expert 10.6 hxv [9].....	34
1.10: Princip pájení fungování stanice Martin Expert 10.6 hxv [10] .....	34
1.11: Provedení pájecího nástroje stanice Martin Expert 10.6 hxv [10] .....	34
1.12: Princip ohřevu součástky stanicí HAKKO FR-811 [11].....	36
1.13: Stanice HAKKO FR-811 [11] .....	36
1.14: Jednotka spodního přehřevu C5023 [13] .....	37
1.15: Základní konstrukce termočlánku [14] .....	38
1.16: Schéma měření teploty pomocí termočlánku [15] .....	38
1.17: Měření pomocí dvou termočlánků [15] .....	38
1.18: Ukázka složení a vlastností jednotlivých druhů termočlánků [16] .....	40
1.19: Použitý teplotní profiloměr se šesti kanály [17] .....	40
2.1: Průběh profilu RTS [18] .....	41
2.2: Průběh profilu RTS [19] .....	42
2.3: Přípravek pro měření homogenity ohřevu .....	44
2.4: Měření homogenity ohřevu stanice Martin .....	44
2.5: Měření homogenity ohřevu stanice Hakko .....	45
2.6: Vrchní strana testovací DPS s označením termočlánků.....	46
2.7: Spodní strana testovací DPS s označením termočlánků .....	47
2.8: Průběhy prvního měření na stanici Martin.....	50
2.9: Průběhy druhého měření na stanici Martin .....	50
2.10: Ukázka stanovování parametrů na samostatném průběhu (měření 1).....	51
2.11: Průběhy prvního měření na stanici Hakko.....	54
2.12: Průběhy druhého měření na stanici Hakko .....	54

## SEZNAM TABULEK

1.1	Zobrazení některých pouzder typu THT .....	13
1.2	Zobrazení některých pouzder typu SMP .....	14
1.3	Zobrazení některých pouzder typu Chip Carrier .....	15
1.4	Zobrazení některých pouzder typu PGA .....	15
1.5	Zobrazení některých pouzder typu Flatpak .....	17
1.6	Zobrazení některých pouzder typu CSP a čipů bez pouzder .....	18
1.7	Zobrazení některých pouzder polovodičových součástek .....	20
1.8	Porovnání parametrů vývodů pouzder C-BGA s roztečí 1,25 mm [4] .....	24
1.9	Parametry vývodů pouzder T-BGA [4] .....	25
1.10	Parametry vývodů pouzder $\mu$ -BGA [4] .....	26
1.11	Porovnání běžných parametrů pouzder BGA [4] .....	26
1.12	Parametry stanice Martin [10] .....	35
1.13	Parametry stanice FR-811 [12],[13] .....	37
2.1	Parametry tepelně vodivé pasty .....	48
2.2	Nastavení teplotního profilu stanice Martin .....	49
2.3	Nastavení teplotního profilu stanice Hakko .....	53
2.4	Porovnání výhod a nevýhod obou použitých stanic .....	57
2.5	Porovnání naměřených parametrů .....	57

# Úvod

Nedílnou součástí zhotovování elektronických součástek, integrovaných obvodů a čipů je otázka jejich pouzdření. Význam pouzder přitom již dávno nespočívá čistě v ochraně dané součástky či obvodu, zamezení padělání či omezení vlivů okolního prostředí. Rozmanitost pouzder s sebou přináší také značnou míru technologických nároků na samotný návrh, konstrukci prototypů, sériovou výrobu i případné opravárenské procesy.

Rozmanitost pouzder integrovaných obvodů nám však zároveň může usnadnit konstrukci elektronických zařízení. Lze kupříkladu vybírat z pouzder různých tvarů, s různým provedením vývodů, kontaktů, s různou chemickou, mechanickou či tepelnou odolností. Výběr součástek s vhodnými pouzdry může mít vliv mimo jiné i na počet kroků výroby či jejich náročnost, což se následně projeví na výrobních nákladech.

Otázka pouzdření je tedy velmi rozmanitý pojem, kterému je vhodné věnovat patřičnou pozornost. Některá pouzdra však svou konstrukcí přinášejí nejen zajímavá konstrukční řešení, ale i úskalí. Jako jedno takové pouzdro si uveďme pouzdro BGA, kterému bude v následující práci věnována zvýšená pozornost. Toto pouzdro svým neobvyklým uspořádáním kontaktů po celé jeho spodní straně umožňuje na desku plošných spojů osadit součástku s velkým počtem vývodů, které jsou rozmístěny na menší ploše, než by umožnilo čtverhranné pouzdro s vývody po obvodu. Jednou z nevýhod, kterou s sebou zmíněné pouzdro přináší je například znesnadnění kontroly připájení či komplikace při opravárenských procesech.

# 1. POUZDŘENÍ A DRUHY POUZDER

## 1.1 Základní popis a vlastnosti

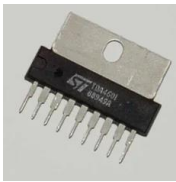



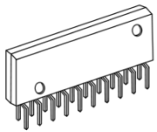
Pouzďení elektronických obvodů má stále větší vliv na kvalitu a parametry vyráběných obvodů, systémů a zařízení. Požadavky výrobců elektronických zařízení je v některých směrech stále náročnější plnit, jelikož neustále rostou požadavky zákazníků. Pouzdra musí plnit různé funkce, které se mohou dle použití do jisté míry lišit. V zásadě je to však zajištění vedení signálů, odvod tepla, ochrana a opora čipů a součástek, zvýšení hustoty osazování součástek, lepší spolehlivost, nižší spotřeba, ochrana proti vlivům prostředí a podobně [1].

### 1.1.1 Pouzdra THP (THT)

Zkratka THT vychází z anglického Through-Hole Technology, neboli technologie vývodových součástek. Z pohledu pouzder pak hovoříme o THP, neboli Through-Hole Package. Pouzdra pro zástrčnou montáž a jejich stručný popis:

- SIP (SIL) – Single In-line Package
  - Pouzdro je tvaru kvádrů s vývody pouze na jedné z delších stran.
  - Pouzdro může obsahovat i chladič, jeho omezením však jsou velké rozměry při větším počtu vývodů.
- DIP – Dual In-line Package
  - Pouzdro je tvaru kvádrů, vývody jsou tentokrát po obou delších stranách.
  - Často bývá název pouzder DIP uváděn ve formátu DIPn, kde n značí počet vývodů.
- CERDIP – Ceramic Dual In-line Package
  - Provedením jde o stejné pouzdro jako DIP, ke zhotovení pouzdra je však použita keramika.
  - Pouzdro je tvořeno ze dvou dílů, spodního s nakontaktovaným čipem horního, které jsou zataveny skleným materiálem.
- QIP a QIL – Quadruple In-line Package
  - Pouzdra QIP jsou shodné s pouzdry DIP, zásadní rozdíl však tvoří vývody. Vývody jsou realizovány po delších stranách ve dvou řadách. Vývody v jedné řadě jsou zkráceny.
  - Výhodou je dvojnásobný počet vývodů při stejné délce pouzdra při zachování spolehlivosti pájení.
- SDIP – Skinny DIP
  - Pouzdro DIP s vývody s menším rozestupem.
- ZIP – Zig-zag In-line Package
  - Vychází z pouzder SIP, vývody jsou tedy na delší straně pouzdra, nyní však ve dvou řadách, kdy jedna je odkloněna (ohnuta) od druhé.

Tabulka 1.1 Zobrazení některých pouzder typu THT

SIP [2]	DIP [2]	CERDIP [2]	QIP [2]
			
ZIP [3]			
			

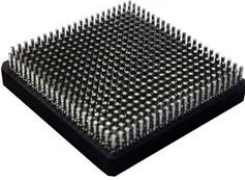
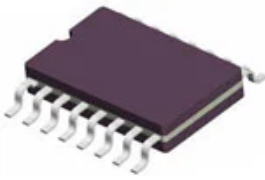
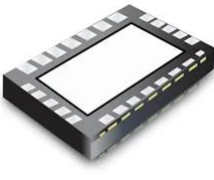

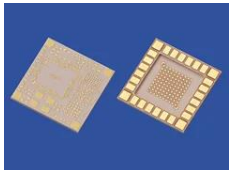
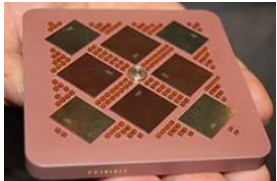
### 1.1.2 Pouzdra SMP (SMT)

Zkratka SMT vychází tentokrát z anglického Surface Mount Technology, tedy technologie pro povrchovou montáž. Z pohledu pouzder jde o pouzdra SMP, tedy Surface Mount Package. Pouzdra pro povrchovou montáž a jejich stručný popis:

- CCGA – Ceramic Column Grid Array
  - Pouzdro tvaru čtverce či obdélníku.
  - Vývody jsou válcového tvaru, jsou tvořeny pájkou a jsou uspořádány v pravoúhlé síti.
- CERPAK – Ceramic Package
  - Jde o obdobu pouzder DIP zhotovenou z keramických materiálů.
  - Zhotovení je obdobné jako u pouzder CERDIP.
- LLP – Leadless Leadframe Package
  - Pouzdro s nízkým profilem.
  - Vhodné pro vsazování a nakontaktování čipů malých rozměrů.
  - Vývody jsou přímo na ploše pouzdra, tedy bez přesahů.
- LGA – Land Grid Array
  - Pouzdro obsahuje na spodní straně pole kontaktních plošek.
  - Připojení k DPS je možné pomocí pájení nebo vsazením do vhodného zástrčného slotu (socket).
- LTCC – Low Temperature Co-fired Ceramic
  - Keramické pouzdro je vhodné pro zhotovení součástek nanášením odporových, vodivých či dielektrických cest přímo na keramický základ.
  - Následný výpal probíhá najednou, výsledné pouzdro s vyhotovenými motivy tedy vzniká v rámci jednoho výpalu.

- MCM – Multi-chip Module
  - Propojuje více integrovaných obvodů (IC) na jednom substrátu. Tyto komponenty mohou být zalaty plastovým materiálem.
  - Provedení se může velmi lišit, jednotlivé integrované obvody mohou být umístěny vedle sebe do plochy nebo nad sebou.

Tabulka 1.2 Zobrazení některých pouzder typu SMP

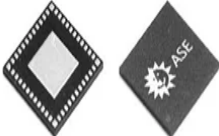
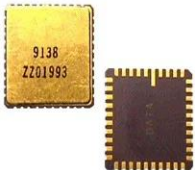


CCGA [2]	CERPAK [2]	LLP [2]
		
LGA [2]	LTCC [2]	MCM [2]
		

### 1.1.3 Pouzdra SMP jako nosiče čipů (chip carriers)

Tato pouzdra jsou typicky vyhotovena s kontakty na všech stranách a bývají pájena přímo na DPS nebo vkládána do zástrčných slotů (socket) [2]. Příklad zástupců čipových nosičů a jejich stručný popis:

- BCC – Bump Chip Carrier
  - Vývody pouzdra jsou realizovány na jeho těle.
  - Vývody jsou tvořeny oblými hrbolky.
- LCC – Leadless Chip Carrier
  - Pouzdro tvaru čtverce.
  - Vývody jsou tvořeny kontaktními plochami.
- CLCC – Ceramic Leadless Chip Carrier
  - Obdoba nosiče LCC, je však zhotoven z keramických materiálů.
- PLCC – Plastic Leaded Chip Carrier
  - Pouzdro čtvercového tvaru. Na rozdíl od LCC a CLCC obsahuje vývody.
  - Vývody jsou typu J, tedy přesahující ze stran a stáčeující se směrem ke spodní straně pouzdra.

Tabulka 1.3 Zobrazení některých pouzder typu Chip Carrier

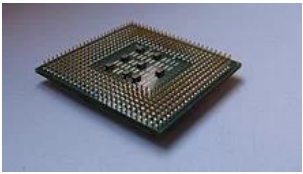
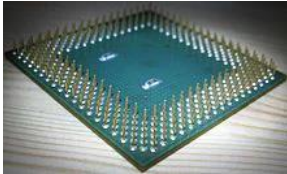
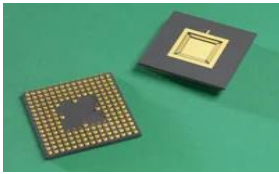
BCC [2]	LCC [2]	CLCC [2]	PLCC [2]
			

#### 1.1.4 Pouzdra PGA

Zkratka PGA pochází z anglického Pin Grid Array, jde tedy o pouzdra, která mají typicky na spodní straně vývody rozložené v poli či pravoúhlé síti v provedení kolíků. Tato síť vývodů přitom nemusí nutně pokrývat celou spodní plochu pouzdra. Pouzdra PGA jsou osazována na DPS pomocí zástrčné montáže nebo jsou vkládány do zástrčných slotů (socket) [2]. Zástupci pouzder PGA a stručný popis:

- PGA – Pin Grid Array
  - Pouzdro je čtvercového tvaru.
  - Vývody jsou realizovány jako pole kolíkových vývodů (pinů), v pravoúhlé síti.
- FC-PGA – Flip-chip Pin Grid Array
  - Na vrchní straně je pomocí kuliček pájky osazen flip-chip, který je nakontaktován na vývody na spodní straně.
  - Vývody jsou realizovány jako pole kolíkových vývodů (pinů), v pravoúhlé síti.
  - Výhodou je, že zmíněný čip je více odhalen, což usnadní dodatečnou realizaci odvodu tepla.
- PPGA, CPGA – Plastic PGA, Ceramic PGA
  - Jde o modifikace pouzder PGA, kdy je ke zhotovení pouzdra použit plast (PPGA) nebo keramika (CPGA).

Tabulka 1.4 Zobrazení některých pouzder typu PGA

PGA [2]	FC-PGA [2]	CPGA [2]
		



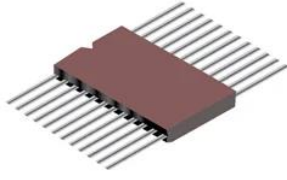







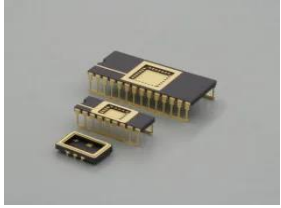

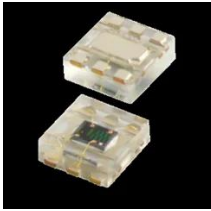

### 1.1.5 Pouzdra Flat Package

Jde o plochá pouzdra, která byla standardizována americkou armádou. Pro tato pouzdra bývá používán výraz Flatpak. Součástí těchto definic jsou nejen rozměry pouzder, jejich obrys ale i materiál, ze kterého mohou být vyrobeny či konkrétní provedení vývodů [1], [2].

Zástupci pouzder Flatpak a jejich stručný popis:

- CFP – Ceramic Flat Package
  - Pouzdro z keramického materiálu je nejčastěji obdélníkového tvaru s vývody po dvou delších stranách.
- CQFP – Ceramic Quad Flat Package
  - Pouzdro čtvercového tvaru, do kterého je zalitý rámeček s vývody.
- BQFP – Bumped Quad Flat Package
  - Jde o pouzdro QFP, které je doplněno v rozích o tvarované výčnělky.
  - Výhodou je ochrana vývodů proti mechanickému poškození, snadnější orientace a napařování součástky při osazování.
- DFN – Dual Flat No Leads Package
  - Jde o pouzdra čtvercového či obdélníkového tvaru.
  - Provedení je bezvývodové, kontaktní plochy jsou umístěny ze všech čtyř stran pouzdra.
- PQFN – Power Quad Flat Package
  - Konstrukčně podobný DFN, je však navrženo pro lepší odvod tepla.
  - Pouzdro obsahuje na spodní straně pasivní chladič, který rozvádí přebytečné teplo do DPS.
- QFP – Quad Flat Package
  - Pouzdro čtvercového či obdélníkového tvaru.
  - Vývody typu gull wing jsou vyvedeny podél všech čtyř stran.
  - Bezvývodovou variantou jsou pouzdra QFN.
- LQFP – Low Profile Quad Flat Package
  - Pouzdra QFP s nižším profilem.
- ODFN – Optical Dual Flat No Lead
  - Průhledná verze pouzdra DFN.
- SBDIP – Sidebrazed Dual In-line Package
  - Jedná se o starší technologii pouzdření.
  - Pouzdro nejčastěji obdélníkového tvaru. Vývody jsou vyvedeny po obou delších stranách.
  - Pouzdro je tvořeno jednou keramickou částí na rozdíl od pouzder CERDIP, která jsou tvořena třemi.
- TQFP – Thin Quad Flat Package
  - Obdoba pouzdra QFP v tenkém provedení.
  - Jeho bezvývodovou variantou je pouzdro TQFN.

Tabulka 1.5 Zobrazení některých pouzder typu Flatpak

CFP [2]	CQFP [2]	BQFP [2]
		
DFN [2]	PQFN [2]	LQFP [2]
		
QFN [2]	QFP [2]	SBDIP [2]
		
TQFP [2]	ODFN [2]	TQFN [2]
		

### 1.1.6 Pouzdra CSP

Pouzdra CSP (Chip Scale Package) jsou pouzdra, jejichž plocha není větší než 1,2 násobek plochy čipu uvnitř [2]. Tato pouzdra se dříve nepřesně označovala jako chip size, tedy pouzdra velikosti čipu. Tento výraz je však nepřesný, jelikož v praxi jen v některých případech je pouzdro skutečně velikosti čipu. Výraz scale (měřítko) tedy lépe vystihuje podstatu většiny těchto pouzder. Zástupci pouzder CSP a jejich stručný popis:

- CSP – Chip Scale Package
  - Povětšinou křemíkový čip uvnitř je uložen v pouzdře, jehož plocha je maximálně 1,2x větší než plocha samotného čipu (v angličtině označováno jako Die).


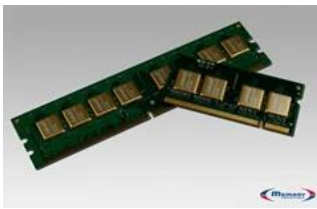



- TCSP – True Chip Size Package
  - Čip je uložen většinou ve čtverhranném pouzdře.
  - Toto pouzdro je stejné velikosti jako samotný čip.

### 1.1.7 Čipy bez pouzder

Existují čipy aplikace, kdy se čip neopatřuje pouzdem. Příklady takových aplikací mohou být následující:

- COB – Chip On Board
  - Čip je osazen přímo na DPS, se kterou je následně spojen například mikrodrátky.
- COF – Chip On Flex
  - Jde o obdobu COB, DPS je však flexibilní.
- COG – Chip On Glass
  - Čip je v tomto případě osazen na skleněný podklad.
  - Takto osazované čipy jsou využívány například pro LCD displeje.

Tabulka 1.6 Zobrazení některých pouzder typu CSP a čipů bez pouzder

CSP [2]	TCSP [2]	COB [2]
		
COF [2]	COG [2]	
		







### 1.1.8 Pouzdra diskretních součástek

Kromě pouzder čipů se v elektrotechnické praxi setkáváme i s pouzdry diskretních součástek. Zástupci některých těchto pouzder:

- MELF (Metalized Electrode Leadless Face)
  - Pouzdro MELF je běžně využívaným pouzdem rezistorů a polovodičových diod.
  - Tělo pouzdra je tvořeno sklem nebo pryskyřicí.

- V případě diod je blíže k jedné straně pouzdra umístěn proužek, kterým je označována katoda součástky.
- Pouzdro je tvaru válce, jehož podstavy jsou metalizovány.
- Jde tedy o pouzdro bez vývodů, které k připevnění na DPS využívá metalizované plochy.
- SOD (Small Outline Diode)
  - Jde o pouzdro malých rozměrů využívané pro diody pro povrchovou montáž.
  - Pouzdro je nejčastěji tvaru kvádru s vývody.
  - Vývody jsou umístěny na kratších stranách pouzdra.
- SOT (Small Outline Transistor)
  - Pouzdro SOT je pouzdro používané pro tranzistory pro povrchovou montáž.
  - Pouzdro tvaru kvádru je opatřeno jedním vývodem na jedné z delších stran, zbylé dva vývody jsou umístěny na protilehlé straně.
- Pouzdra TO-x (Transistor Outline)
  - Tato pouzdra mohou být v závislosti na konkrétním typu pro povrchovou i zástrčnou montáž.
  - Pouzdra TO se vzájemně liší nejen tvarem, ale i materiálem pouzdra.
  - Pouzdra jsou značena ve formátu TO-x, kde x je konkrétní číslo značící typ pouzdra.
  - Pouzdra bývají zhotovována z různých kovů, ale i plastu.

Tabulka 1.7 Zobrazení některých pouzder polovodičových součástek

MELF [2]	SOD [2]	SOT [2]
		
TO - 3 [2]	TO - 18 [2]	TO - 92 [2]
		
TO - 100 [2]	TO - 247 [2]	TO - 252 (DPAK) [2]
		

## 1.2 Pouzdra BGA

### 1.2.1 Základní charakteristika:

Vznik pouzder BGA byl podmíněn požadavky na zmenšování pouzder při nutnosti zachování velkého počtu vývodů. Konstrukční předlohou pro tato pouzdra byla pouzdra PGA. Hlavní rozdíl mezi pouzdry PGA a BGA představuje provedení jejich vývodů, které mají u pouzder BGA kulový tvar. K vidění je také provedení vývodů formou válečků, v obou případech jsou však vývody vyhotoveny z pájky. Jednotlivá pouzdra BGA se mohou dále vzájemně lišit uspořádáním vývodů. Vývody mohou být umístěny po celé spodní ploše pouzdra, je zde však tendence umisťovat vývody přednostně po obvodu spodní plochy pouzdra, či po obvodu spodní plochy pouzdra a jejím středu, tedy s vynechanou mezioblastí. Vývody v samotném středu pak zpravidla slouží pouze k odvodu tepla z čipu. Takovéto umístění vývodů je vhodné volit kvůli problematickému pájení těchto pouzder, kdy je velice obtížné dosáhnout rovnoměrného teplotního profilu. S nerovnoměrným teplotním profilem dále souvisí spolehlivost výsledného zařízení [4],[7].

Z principu konstrukce pouzder BGA a uspořádání jejich vývodů tedy vyplývají některé jejich nevýhody. Mezi hlavní nevýhody patří obtížná kontrola správného spojení pouzdra BGA s Osazovanou DPS. Nepřístupnost kontaktů pouzdra s DPS následně komplikuje kontrolu výsledných spojů a případnou opravitelnost. Selektivní dopájení některých kontaktů je pak zcela nemožné. Obdobně fatální mohou být i další nevýhody pouzder BGA, které nejsou na první pohled viditelné. Příkladem je nutnost přizpůsobení součinitele teplotní délkové roztažnosti pouzder a osazovaných DPS, který je v případě pouzder s vývody do značné míry kompenzován jejich pružností [7].

Mezi hlavní výhody pouzder BGA patří vysoký počet vývodů na malé ploše pouzdra, kdy je tato plocha efektivně využita. Tato pouzdra jsou oproti běžnějším typům pouzder s vývody po obvodu méně náchylná na poškození při manipulaci [7].

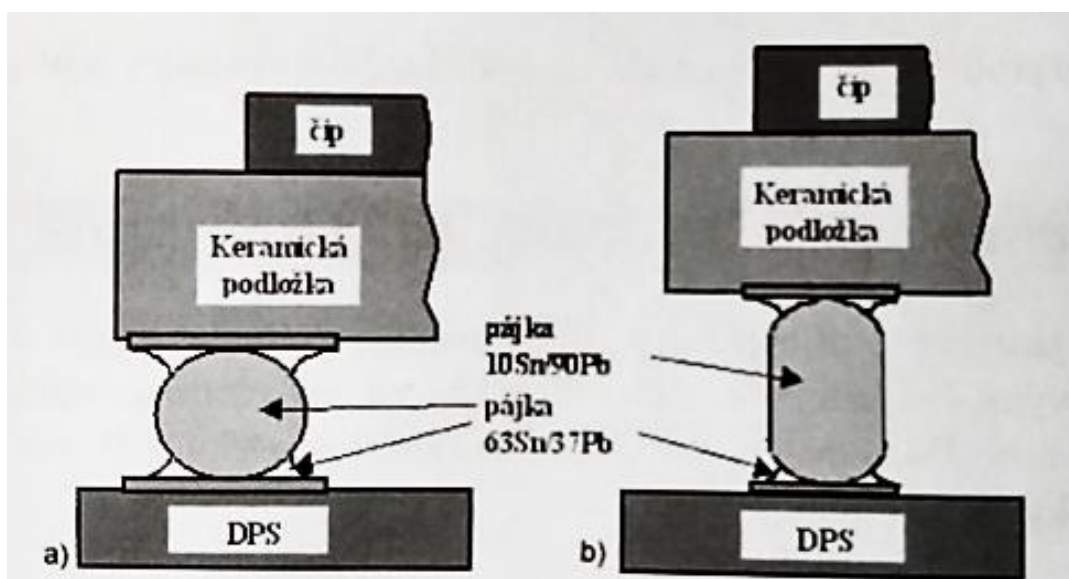
### 1.2.2 Konstrukce pouzder BGA a jejich druhy

Pouzdra BGA obsahují čip, který je připevněn na nosný substrát pomocí eutektického pájení, metodou flip-chip nebo pomocí epoxidového lepidla, které obsahuje plnivo ze stříbra. Čip je následně nakontaktorván na kontaktní plochy na horní straně nosného substrátu pomocí mikrodrátků technikou zvanou wire-bonding nebo metodou flip-chip. Pomocí mikrodrátků se připojují holé čipy s kontakty na horní straně, metoda flip-chip pak využívá otočení samotného čipu s vlastními kontakty směrem k nosnému substrátu. Nosné substráty jsou většinou FR4, BT (bis-maleimidové triazinové pryskyřice) nebo keramické s vrstvou mědi tloušťky 18  $\mu\text{m}$ . Kontakty horní vrstvy, na které jsou nakontaktovány kontaktní plochy čipu pomocí mikrodrátků jsou s kontaktními plochami na spodní straně propojeny pomocí pokovených otvorů. Samotný čip s mikrodrátků je pak chráněn plastovým pouzdem v případě P-BGA nebo keramickým pouzdem v případě C-BGA [4],[7].

Vývody pouzdra BGA mohou mít podobu kuliček nebo válečků (viz. obrázek 1.2), které jsou zhotoveny většinou ze slitiny SnPb a jsou uspořádány po celé ploše pouzdra, pouze po obvodu nebo po obvodu a ve středu pouzdra. Nejvíce používané rozteče těchto vývodů jsou 0,5 mm; 0,75 mm; 0,8 mm; 1 mm; 1,27 mm a 1,5 mm. Počet vývodů bývá od 4 x 4 při rozměrech pouzdra 7 x 7 mm do 49 x 49 při rozměrech pouzdra 50 x 50 mm [4],[7].



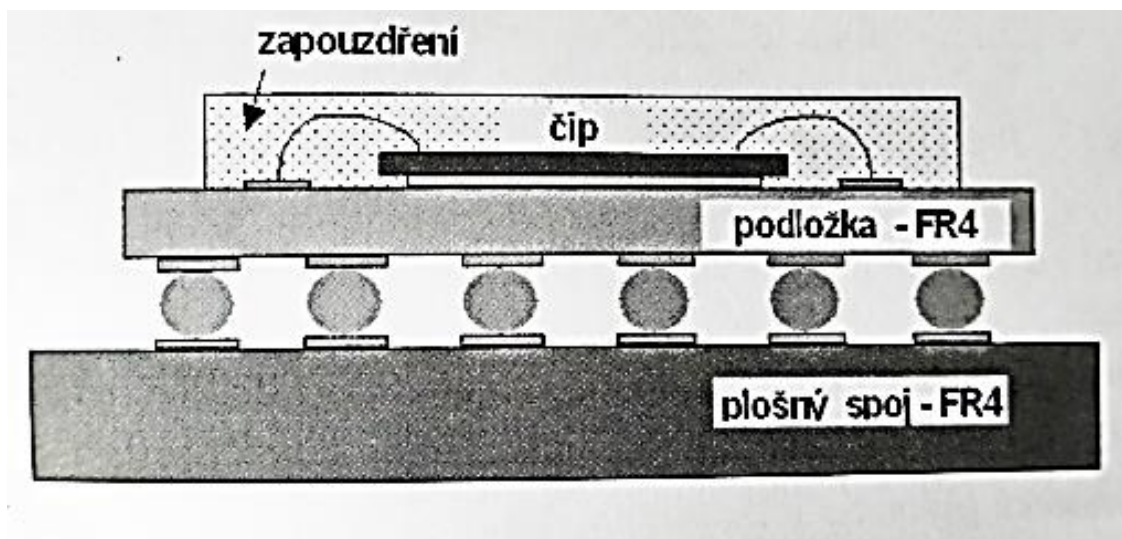
Obrázek 1.1: Rozmístění vývodů pouzder BGA [4]



Obrázek 1.2: Možnosti provedení vývodů pouzder BGA [4]

### 1.2.3 Pouzdra P-BGA

V případě pouzder P-BGA (Plastic) je nosný substrát v místě pod čipem pozlacen. Čip je na tuto plochu následně upevněn epoxidovým lepidlem nebo eutektickým pájením. Čip je zde kontaktován mikrodrátky na kontaktní plochy na vrchní straně nosného substrátu. Tyto kontakty jsou následně propojeny pokovenými otvory, které jsou zhotoveny skrz podložku FR4 na kontakty na spodní straně nosného substrátu. Na kontaktech spodní strany nosného substrátu se nacházejí kuličky pájky, které tvoří výsledné vývody pouzdra BGA. Použití stejného materiálu podložky a DPS zde má za následek vyrovnání teplotních délkových roztažností obou spojovaných objektů a tím dochází k minimalizaci pnutí [4].



Obrázek 1.3: Pouzdro P-BGA s kontaktováním čipu metodou wire-bonding [4]

#### 1.2.4 Pouzdra C-BGA

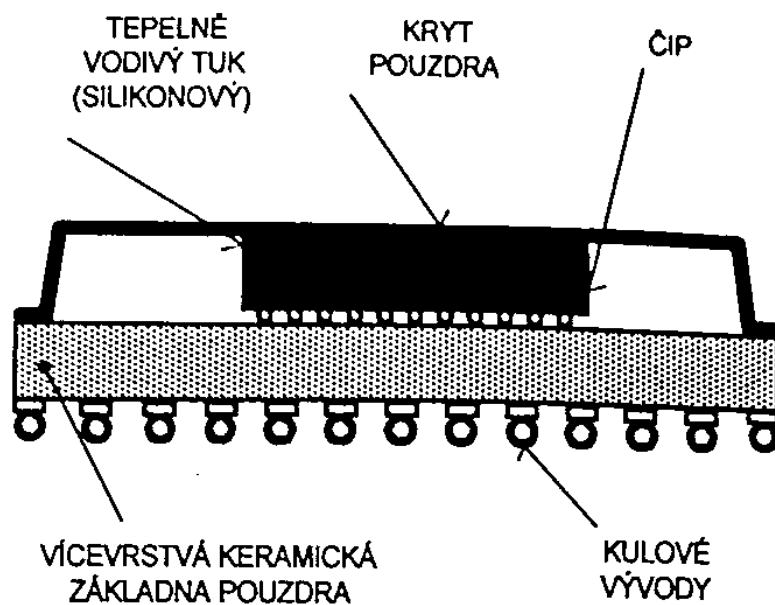
Pouzdra C-BGA (Ceramic Ball Grid Array) se zpravidla nevyužívají u zařízeních spadajících do kategorie běžně dostupné spotřební elektroniky. Pořizovací náklady na pouzdra C-BGA jsou vyšší, vynikají však vyšší odolností a spolehlivostí [7].

Nosným substrátem, na který je vsazován čip je keramika. Čip je následně kontaktován mikrodrátky nebo metodou flip-chip. Kryty těchto čipů jsou na rozdíl od pouzder P-BGA zhotoveny z keramiky nebo kovu [4],[7].

Výhodou keramického nosného substrátu je možnost zhotovování vícevrstevných struktur pomocí sítotiskových metod. Počet vrstev nosného substrátu v případě pouzder C-BGA je obvykle 3 – 5 vrstev [4],[7].

Hlavní nevýhodou keramického substrátu je jeho hodnota součinitele teplotní délkové roztažnosti TCE, který nabývá u používané keramiky hodnot 5 – 7 ppm/K. Při zapájení na DPS z materiálu FR4, kdy tento materiál nabývá hodnot TCE 12 – 24 ppm/K v případě FR4 dochází po připájení pouzdra k takovému podkladu k velkému pnutí [4].





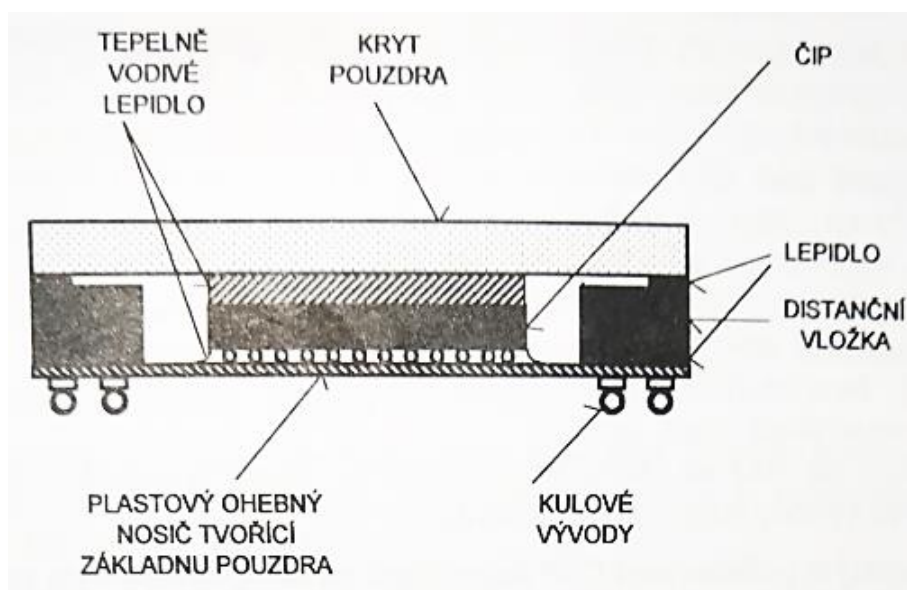
Obrázek 1.4: Pouzdro C-BGA s kontaktováním čipu metodou flip-chip [7]

Tabulka 1.8 Porovnání parametrů vývodů pouzder C-BGA s roztečí 1,25 mm [4]

Průměr kuliček pájky [mm]	Průměr válečků pájky [mm]
0,88	0,50
Výška kontaktu [mm]	Výška kontaktu [mm]
0,88	2,18

### 1.2.5 Pouzdra T-BGA

V případě pouzder T-BGA (Tape Ball Grid Array) je osazovaný flip-chip připojován na pružný nosný substrát, který má tloušťku 0,05 mm. Nosný substrát je z obou stran pokoven mědí, přičemž vrchní strana je signálová a spodní zemnicí. Tato konfigurace je vhodná z hlediska stínění. Propojení obou stran je realizováno pokovenými otvory jako v případě tvrdých substrátů. Pružný nosný substrát je v oblasti nad vývody pouzdra vyztužen kovovou výztuží. Tato výztuž je fixována pružným lepidlem. Typické délky hran těchto pouzder bývají od 21 do 40 mm, počet vývodů bývá v rozmezí 192 – 736. Cena těchto pouzder je srovnatelná s cenou pouzder C-BGA, výhodou je nízký profil pouzdra do 1,9 mm [4],[7].



Obrázek 1.5: Pouzdro T-BGA s kontaktováním čipu metodou flip-chip [7]

Tabulka 1.9 Parametry vývodů pouzder T-BGA [4]

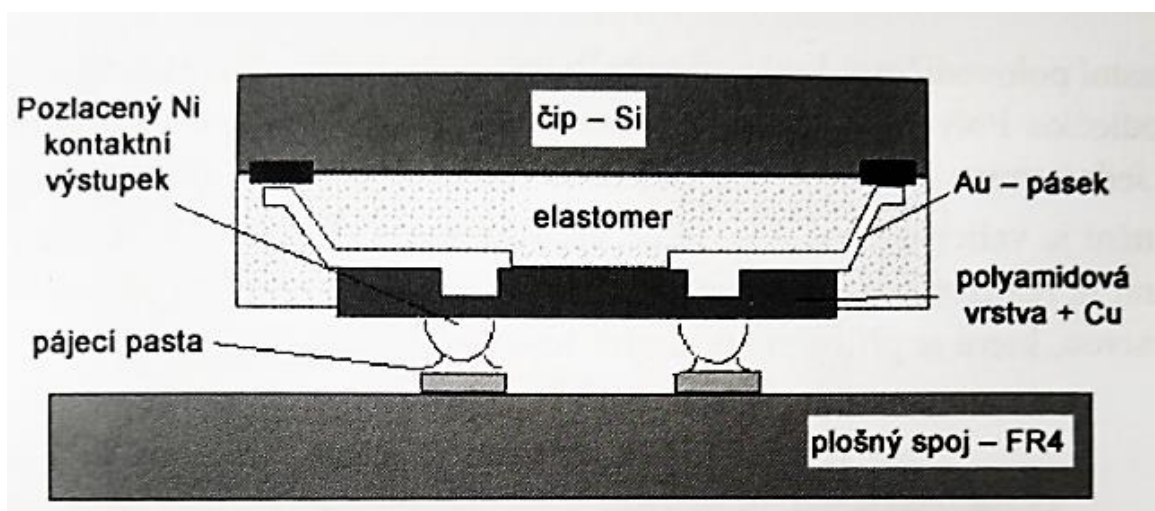
Průměr kuliček pájky [mm]	Vzdálenost mezi kuličkami [mm]
0,63	1; 1,25 nebo 1,5

### 1.2.6 Pouzdra $\mu$ -BGA

Pouzdra BGA jsou nejmodernější modifikací pouzder BGA, která jsou konstruována pro dosažení menších roztečí vývodů. Hustota vnitřních propojení v pouzdru je taktéž vyšší [7].

Konstrukce pouzder se liší v závislosti na konkrétním výrobci. Vývody jsou obvykle provedeny jako oblé hrbolky na spodní straně pouzdra [4].

Jako příklad konstrukce pouzder  $\mu$ -BGA poslouží pouzdro firmy TESSERA. Čip je zde připevněn elastickým lepidlem k pružnému základnímu substrátu, který je tvořen polyimidovou podložkou s vrstvou mědi. Čip je se substrátem propojen pomocí zlatých pásků. Výhodou těchto pouzder je kromě malé rozteče vývodů ještě dosažení lepších elektrických vlastností. Toto pouzdro může být realizováno jako pouzdro typu CSP (Chip Scale Package), tedy pouzdro velikosti čipu, kdy jsou rozměry pouzdra ku rozměrům čipu v poměru 1:1 [4].



Obrázek 1.6: Pouzdro  $\mu$ -BGA firmy TESSERA [4]

Tabulka 1.10 Parametry vývodů pouzder  $\mu$ -BGA [4]

Výška vývodů [mm]	Vzdálenost mezi vývody [mm]
0,085	0,3; 0,5; 1; 1,27 nebo 1,5

Tabulka 1.11 Porovnání běžných parametrů pouzder BGA [4]

Parametr	BGA	T-BGA	$\mu$ -BGA
Počet vývodů	225	224	313
Plocha zabíraná na DPS [mm <sup>2</sup> ]	670	530	252
Hmotnost [g]	1	5	0,47
Indukčnost přívodů [nH]	3 – 5	1,3 – 5,5	0,5 – 5,1
Kapacita [pF]	1	0,4 – 2,4	0,05 – 0,2
Tepelný odpor [°C/W]	10	1,5	0,2 – 2

## 1.3 Vliv teploty na elektronické součástky a zařízení

### 1.3.1 Základní veličiny

Elektrotechnické součástky, pouzdra i DPS jsou tepelně namáhány. Tepelný management je navíc potřeba řešit nejen při tepelném namáhání vlivem ztrát při průchodu elektrického proudu, ale i v případě případných oprav a předělávek za použití zdrojů tepla (procedury repair a rework).

Způsoby přenosu tepla se dle principu dělí na přenos vedením, prouděním a zářením. Vzhledem k zaměření práce nebude dále pohlíženo na teplo vzniklé při provozu zařízení, ale na teplo dodávané zařízení a jeho součástkám při opravárenských procesech, tedy z externích zdrojů. Jednou ze sledovaných veličin je v tomto případě teplotní součinitel délkové roztažnosti TCE [5].

TCE (Temperature Coefficient of Expansion) jinak známý jako  $\alpha$  je definovaný vztahem:

$$TCE = \frac{dl}{l_0} \cdot \frac{1}{dT} \quad (1.1)$$

Zde  $dl$  [m] je změna délky,

$l_0$  [m] je původní délka ohřívaného materiálu,

$dT$  [K; °C] je rozdíl mezi koncovou a počáteční teplotou.

Jednotkou TCE je pak °C<sup>-1</sup> nebo K<sup>-1</sup> v závislosti na tom, jestli bylo počítáno s teplotou v Celsiově stupnici nebo s termodynamickou teplotou. Alternativní jednotkou jsou ppm/K, kdy je udáváno prodloužení v počtech miliontin celku.

Po odvození ze vztahu (1.1) získáme vztah pro výsledné prodloužení. Základní jednotkou prodloužení jsou metry [5].

$$\Delta l = TCE \cdot \Delta T \cdot l_0 \quad (1.2)$$

Pro TCE platí, že jeho závislost na teplotě není lineární a výrazně se mění zejména v blízkosti teploty skelného přechodu, kdy se látka mění na kaučukovitou. Hodnota TCE také nemusí u některých materiálů být stejná ve všech směrech[5].

Výsledkem zmíněných faktů je, že vlivem působení teploty může mezi různými, vzájemně spojenými materiály vznikat mechanické namáhání. Toto namáhání se může projevit například mezi DPS a pouzdrem na ní připájeným, kdy jsou oba zmíněné prvky z různých materiálů a s různým TCE. V jednom z technologicky horších případů může nastat situace, kdy je hodnota TCE jednoho prvku kladná a druhá záporná. Výsledné mechanické namáhání může následně způsobit odtrhnutí kontaktu od DPS a tím dojde k přerušení vodivé cesty.

Vlivem mechanického napětí může docházet nejen k odtrhnutí kontaktů (v extrémnějším případě), ale například ke vzniku prasklin a bublin ve spojích, pouzdrech a čípech, kdy nemusí být narušena funkčnost dané struktury ihned, nicméně dochází ke zhoršování jejich vlastností. Výsledkem může být výrazné zkrácení životnosti celého zařízení, kdy vlivem

dalšího teplotního namáhání například vedení elektrického proudu může dojít k rozšiřování těchto prasklin. Při narušení struktury pouzdra může navíc zařízení ztratit svou odolnost z hlediska elektrické izolace, chemické odolnosti, odolnosti prostředí a podobně.

Mechanické napětí ve spojích je definováno Hookovým zákonem [5]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (1.3)$$

Zde  $\sigma$  je mechanické napětí [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ],

$E$  je Youngův modul pružnosti v tahu [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ],

$\varepsilon$  je poměrné prodloužení [-].

Poměrné prodloužení pro demonstraci popsaného problému je vhodné vyjádřit vzorcem (1.4), ze kterého je lépe patrný vliv rozdílu TCE [5]:

$$\varepsilon = (TCE_{\text{souč}} - TCE_{\text{sub}}) \cdot \Delta T \quad (1.4)$$

Zde  $TCE_{\text{souč}}$  je koeficient teplotní délkové roztažnosti součástky,

$TCE_{\text{sub}}$  je koeficient teplotní délkové roztažnosti substrátu.

### 1.3.2 Teplo a jeho přenos

Teplo označuje vnitřní energetický stav, změna tohoto stavu se následně projevuje změnou teploty. Díváme-li se na teplo a teplotu jako na fyzikální děje, je zde dobré uvést pojem tepelná výměna. Tepelná výměna je předávání energie z místa s vyšší energií, tedy s vyšší teplotou do místa s nižší energií.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1.5)$$

Zde  $m$  je hmotnost [kg],

$c$  je měrná tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ],

$\Delta T$  je rozdíl teplot na začátku a na konci tepelné výměny.

Měrná tepelná kapacita  $c$  zde vyjadřuje, kolik tepla je potřeba k ohřátí 1 kg látky o 1 °C. Tepelná výměna může probíhat vedením (Conduction), prouděním (Convection) nebo zářením (Radiation).

### 1.3.3 Přenos tepla vedením

Přenos tepla vedením probíhá na úrovni částic v látkovém prostředí. Tyto částice navíc musejí být v přímém kontaktu, aby si mohly vzájemně předávat svou kinetickou energii. Přenos tepla vedením se tedy vyskytuje zejména u pevných látek.

Přenos tepla je způsobeno volnými elektrony nebo druhým mechanismem, na který můžeme pohlížet podobně jako na přenos zvuku v látkovém prostředí. Přenos energie ve formě tepla je zde realizován kmitem atomů, které svou energii předávají dále v rámci vazeb krystalické mříže. Výsledné předání energie má tedy podobu vlny, jejíž rychlost je stejná jako rychlost zvuku ve stejné látce [5].

Důležitou veličinou pro definování přenosu tepla je tepelný tok. Tepelný tok může prostupovat látkami všech skupenství nebo i mezi látkami navzájem různých skupenství. Jelikož u plynů a kapalin jsou molekuly volněji vázány, projevuje se u nich tepelný tok méně

výrazně než u látek pevných. Tepelný tok lze vyjádřit následujícím vztahem jako podíl prošlého tepla za změnu času [5]:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.6)$$

Zde  $\Phi$  je tepelný tok [W]  
 $dQ$  množství tepla, které prošlo látkou [J]  
 $dt$  změna času [s]

Další veličinou je hustota tepelného toku, která je pro nás relevantní při počítání tepelného toku jednotkovou plochou, která je kolmá na směr šíření tepelného toku.

$$q = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1.7)$$

Zde  $q$  je hustota tepelného toku [ $W \cdot m^{-2}$ ]  
 $d\Phi$  je změna tepelného toku [W]  
 $dS$  jednotková plocha [ $m^2$ ]

Chceme-li hodnotit tělesa na základě schopnosti přenášet teplo, je vhodné si uvést součinitel tepelné vodivosti. Ten udává množství tepla, které projde mezi protějšími stěnami jednotkové krychle, přičemž tyto stěny mají vůči sobě rozdíl teploty 1 K, jeho značkou je  $\lambda$  a jednotkou [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]. [5]. Tepelný tok je následně možno vyjádřit takto:

$$\Phi = \lambda \cdot A \frac{\Delta T}{d} \quad (1.8)$$

Zde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ].  
 $A$  je plocha, kterou kolmo prochází tepelný tok [ $m^2$ ]  
 $d$  je vzdálenost mezi místy s rozdílnou teplotou [m]  
 $\Delta T$  je rozdíl teplot [K; °C]

#### 1.3.4 Přenos tepla prouděním

Při přenosu tepla prouděním v plynech a kapalinách se na vedení tepla podílí jak mechanismus vedení, tak proudění. Projevuje se zde molární i molekulární přenos tepla. Míra zastoupení jednoho či druhého děje závisí na fyzikálních vlastnostech kapaliny [5].

Proudění může být nucené nebo přirozené. U přirozeného proudění se teplejší vzduch rozpíná, následkem čehož jsou jeho molekuly více rozprostřeny. Takto ohřátý plyn stoupá vzhůru a jeho místo nahrazuje chladnější (neohřátý) plyn. Nucené proudění je pak v praxi nejčastěji realizováno pomocí ventilátorů, kdy dochází k vytvoření laminárního nebo turbulentního proudu vzduchu.

Tepelný tok při přenosu tepla prouděním se chová jinak a je popsán vztahem [5]:

$$\Phi = \alpha \cdot A_s \cdot (T_s - T_A) \quad (1.9)$$

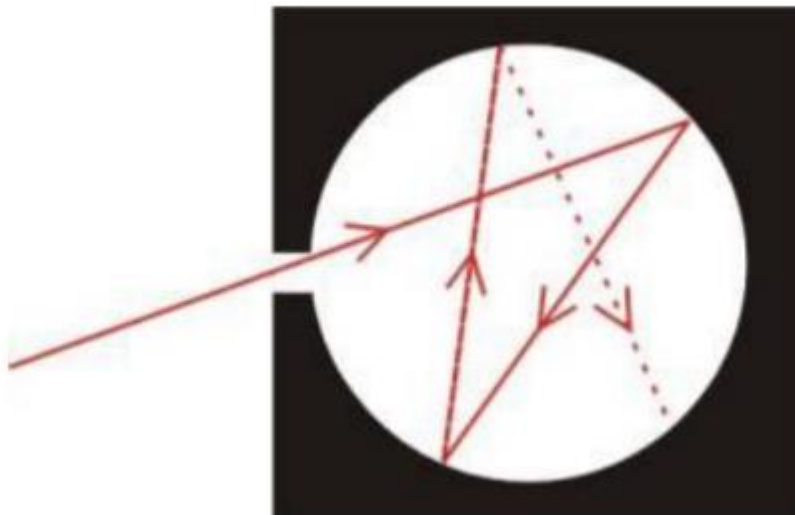
Zde  $\Phi$  je tepelný tok [W]  
 $\alpha$  je koeficient přenosu tepla [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]  
 $A_s$  je plocha, ze které dochází k výměně tepla [ $m^2$ ]  
 $T_s$  a  $T_A$  jsou teploty povrchu a okolního prostředí [K; °C]

### 1.3.5 Přenos tepla zářením

K přenosu tepla zářením dochází u všech těles. Teplu se šíří ve formě elektromagnetické vlny, přičemž frekvence (respektive vlnová délka) tohoto záření je mimo viditelné spektrum.

Jelikož elektromagnetické vlny nepotřebují ke svému šíření látkové prostředí, přenáší se tedy tímto způsobem teplo na rozdíl od předcházejících principů přenosu i vakuem. Šíření tepelného záření probíhá nejčastěji v infračervené oblasti spektra, které odpovídá vlnovým délkám  $\lambda = 0,1 - 100 \mu\text{m}$  [5].

Před dalším výkladem je vhodné si definovat absolutně černé těleso. Těleso může nejen teplo vyzařovat, ale i pohlcovat, propouštět nebo odrážet. V reálných případech není nikdy pohlcena veškerá energie, jistý podíl se vždy vyzáří odrazem nebo tělesem projde. Pro fyzikální popis je však vhodné definovat si absolutně černé těleso, které pohltí veškeré dopadající záření [6]. Teoretickou představu o fungování absolutně černého tělesa si lze udělat z obrázku níže:



Obrázek 1.7: Princip absolutně černého tělesa [6]

Absolutně černé těleso zde představuje otvor do uzavřeného prostoru. Povrch uvnitř je černý a matný. Princip spočívá v tom, že záření projde úzkým otvorem dovnitř, následnými odrazy dojde k postupnému pohlcení veškeré jeho energie. Záření tedy nemá kudy unikat a teplo ze záření pohlcené se následně emituje ve formě tepla ze stěn uzavřeného prostoru.

Těleso pohlcující efektivně příchozí záření je z pravidla i výborným zářičem. Takovéto vlastnosti reálného tělesa jsou charakterizovány relativní emisí povrchu [5].

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (1.10)$$

Zde  $\varepsilon$  je relativní emise povrchu [-]

$E$  je emise reálného tělesa [J]

$E_b$  je emise absolutně černého tělesa [J]

Pro tepelný tok platí:

$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (1.11)$$

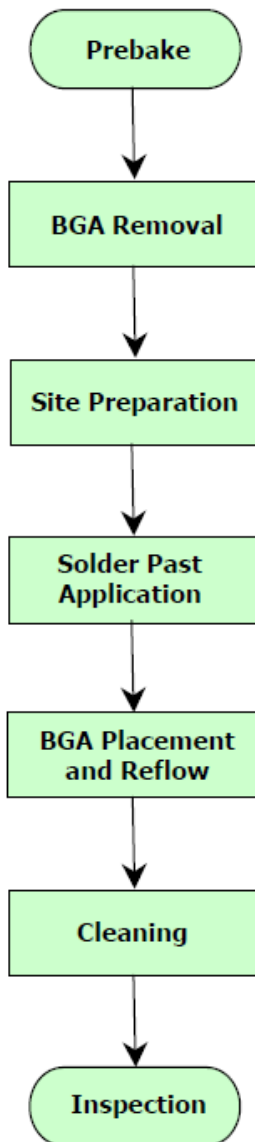
Zde  $\Phi$  je tepelný tok [W]

$\varepsilon$  je relativní emise povrchu [-]

$\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ]

## 1.4 Opravárenské metody pro pouzdra BGA

Po nastínění základní problematiky pájení a kontroly zapájení pouzder BGA je nutno zvážit možnosti případných opravných procesů. Typický průběh této předělovky (rework) probíhá způsobem znázorněným na diagramu (viz obrázek 1.8).



- Základem celého postupu je předehřev celé osazené DPS při teplotě 125 °C po dobu 12 hodin, bylo-li pouzdro vystaveno vlivům okolního prostředí, zejména vlhkosti delší dobu, než jaká je stanovena výrobcem v dodávaných technických listech – specifikace MSL (Moisture Sensitivity Level). Opravy elektronických výrobků je obecně nutno provádět v prostředí s minimálním rizikem vzniku elektrostatického výboje.
- Ve druhém kroku probíhá samotná výměna na specializovaném pracovišti, jejichž příklady budou dále podrobněji rozebrány. Výměna však probíhá dle teplotního profilu doporučeného výrobcem. Výměna probíhá s ohledem na minimalizaci teplotního namáhání okolních komponent.
- Prostor vzniklý vyjmutím BGA pouzdra je následně nutné dočistit od zbytků pájky a dalších reziduí, která se mohou na DPS s kontakty nacházet. Výsledkem tedy musí být čisté a hladké kontakty pro správné osazení nového pouzdra BGA.
- V následujícím kroku je aplikována pájecí pasta nebo pastovitě tavidlo.
- Přesné osazení za pomoci vhodného kamerového systému a zapájení nového pouzdra BGA probíhá opět v souladu s optimálním teplotním profilem při minimalizace teplotního namáhání ostatních osazených komponent.
- Po zapájení je prováděno čištění reziduí a tavidlových zbytků pod pouzdem, není-li použito no-clean tavidlo či vyžaduje-li to konkrétní aplikace.
- Finálním krokem je kontrola, která je nejčastěji realizována pomocí rentgenového záření nebo elektrickou kontrolou [8].



Obrázek 1.8: Princip výměny pouzdra BGA [8]

#### 1.4.1 Předehřev

Předehřev při výměně pouzder BGA je velmi důležitý a citlivý krok při opravárenských operacích s pouzdry BGA. Jeho hlavním úkolem je zamezení takzvaného popcorn efektu, kdy vlivem navlhavosti substrátů, elektroizolačního jádra a samotného pouzdra některých součástí dojde k absorpci vzdušné vlhkosti a následné expanzi vznikajících par při procesu pájení. Tento jev se projevuje bublinami ve struktuře materiálu, který takto ztrácí svou rovinnost a dochází k delaminaci substrátu a mikroprasklinám v pouzdrech. Vznik takovýchto bublin má za následek kompletní znehodnocení takového substrátu či pouzdra součástky. Předehřev probíhá při teplotě 125 °C po dobu 12 hodin [8], nebo dle doporučení v technických listech dle kategorizace MSL.

#### 1.4.2 Výměna pouzdra

Kvůli omezení teplotního namáhání DPS a zbylých součástí je celá deska obvykle předehřívána na teploty kolem 85 °C. Samotné pájení pouzdra probíhá dle doporučeného teplotního profilu pro konkrétní pouzdro. Teplotního profilu v rámci konkrétní oblasti, kde se nachází pouzdro s požadavkem na rework proceduru je dosahováno pomocí zařízení pracujícího na principu horkého vzduchu nebo infračerveného ohřevu. Typický teplotní profil mívá maximální teplotu 240 – 245 °C po dobu maximálně 30 vteřin [8].

V případě výměny pomocí infračerveného ohřevu je soustředěno záření pouze na oblast, kde se nachází pouzdro. V případě horkého vzduchu je vhodného pájecího profilu dosaženo například pomocí umístění pouzdra do uzavřeného přípravku, do kterého je následně horký vzduch vháněn.

#### 1.4.3 Příprava ploch pro osazení nového BGA

Po odpájení a vyjmutí pouzdra například pomocí vakuové pipety je nutno očistit kontaktní plochy na osazované DPS od zbytků pájky. Toho je možno docílit pomocí vakuové odsávačky nebo pomocí speciálních pletených pásek známých pod pojmem odsávací knot (solder-wick). Tyto knoty mohou mít povrchovou úpravu ve formě tavidel. Následně jsou zbylé plochy čištěny pomocí přípravků na bázi alkoholu [8].

#### 1.4.4 Aplikace pájecí pasty

Nanášení pasty může probíhat pomocí dispenzního tisku, v některých případech i pomocí tiskových metod. V případě pouzder BGA jsou vývody přímo tvořeny pájkou, aplikuje se pájecí pasta nebo pastovité tavidlo.

### **1.4.5 Výměna pouzdra BGA**

S pomocí optického systému je ve většině případů nutno správně vyrovnat pouzdro a osazovanou DPS tak, aby došlo k přesnému dosednutí všech vývodů na konkrétní kontaktní plošky. Proces osazování je následně obdobný jako proces vyjmutí pouzdra. Pájení probíhá při vhodně nastaveném teplotním profilu, kdy je co nejvíce omezen teplotní šok DPS a ostatních osazených součástek. K dosažení minimálního gradientu náběhu teploty je docíleno nižší maximální dosaženou teplotou v přetavovacím profilu. Obdobně je vhodné minimalizovat teplotní gradient poklesu teploty při následném chlazení použitím přirozeného odvodu tepla [8].

### **1.4.6 Čištění**

V případě použití no-clean tavidel většinou čištění není potřeba. V některých náročnějších aplikacích je však nutno čištění provádět.

### **1.4.7 Inspekce**

V první fázi lze provést inspekci optickou, kdy je kontrolováno správné vyrovnání pouzdra BGA na DPS. Dále lze vyhodnotit, zda došlo k viditelnému poškození pouzdra či okolních součástek, delaminaci DPS a hodnotit lze i kvalitu zapájení okrajových spojů [8].

Dále již nastupují náročnější kontroly, kdy je nutno využít zařízení pro rentgenovou inspekci či elektrické testování.

## **1.5 Charakteristika použitých opravárenských stanic**

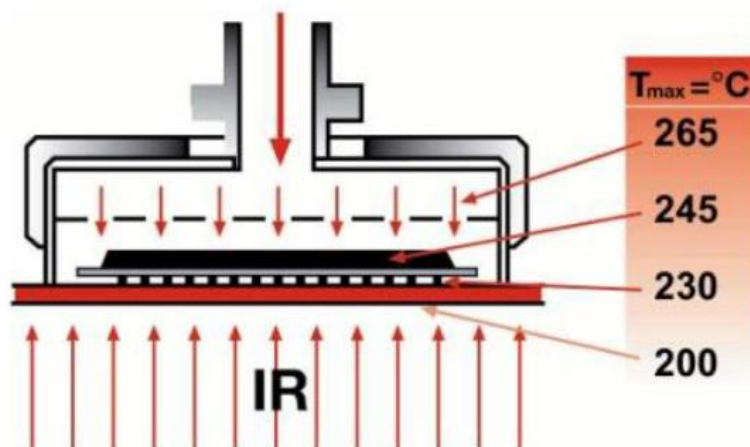
### **1.5.1 Stanice Martin Expert 10.6 h xv**

Příkladem takovéto stanice je model Martin Expert 10.6 HXV dodávaný firmou ABE.TEC. Jde o univerzální stanici pro realizování oprav SMD součástek, BGA pouzder, patič a podobně. Předností těchto stanic je zejména pájení pouzder větších ploch.

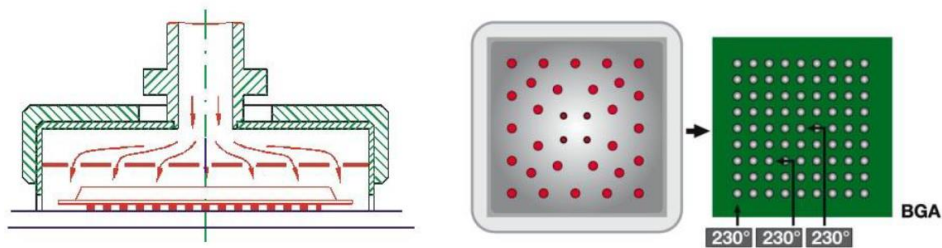
Jednoduchou modifikací této stanice lze také docílit využitelnosti pro pájení přetavením s nastavením teplotního profilu pomocí obslužného software. Tato stanice je zobrazena níže na obrázku 1.9. Ohřev je v tomto případě realizován jednotkou spodního přehřevu společně s pájedlem. Jednotka spodního přehřevu využívá ohřevu pomocí IR záření a je opatřena vzduchovým chlazením pro ochlazení zářičů po ukončení práce. Hlava pájecího nástroje je opatřena otvory různých průměrů, které zajišťují homogenní distribuci tepla a jsou zobrazeny na obrázku 1.11. Pracoviště dále obsahuje všechny prvky pro kompletní opravy SMD komponent. Aplikaci pájecí pasty zajišťuje dávkovač pasty, který umožňuje nanášet kromě pájecích past i tavidla či lepidla. Díky optickému systému umožňuje automatické centrování součástek.



Obrázek 1.9: Stanice Martin Expert 10.6 hxxv [9]



Obrázek 1.10: Princip pájení fungování stanice Martin Expert 10.6 hxxv [10]



Obrázek 1.11: Provedení pájecího nástroje stanice Martin Expert 10.6 hxxv [10]

Tabulka 1.12 Parametry stanice Martin [10]

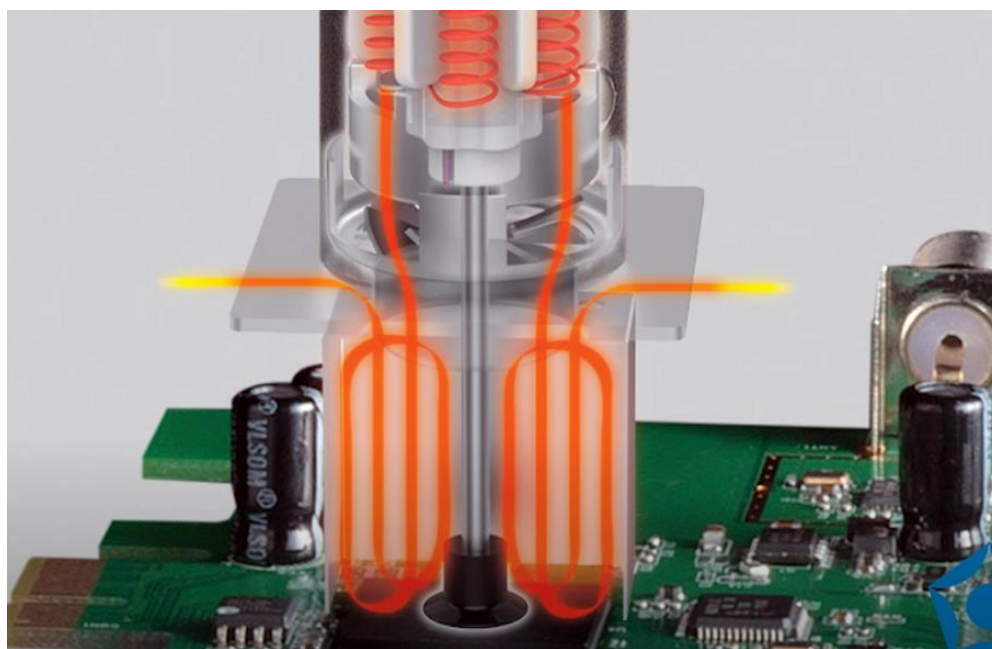
Horní přehřev (pájecí nástroj)	
Maximální teplota	350 °C
Výkon pájedla $P_{\max}$	300 W
Průtok vzduchu	35 l/min
Rozměry stanice (základní plocha)	1030 x 630 mm
Spodní přehřev DPS	
Výkon přehřevu $P_{\max}$	5000 W
Velikost pracovní plochy	450 x 420 mm
Maximální velikost DPS	480 x 480 mm

### 1.5.2 Stanice Hakko FR-811

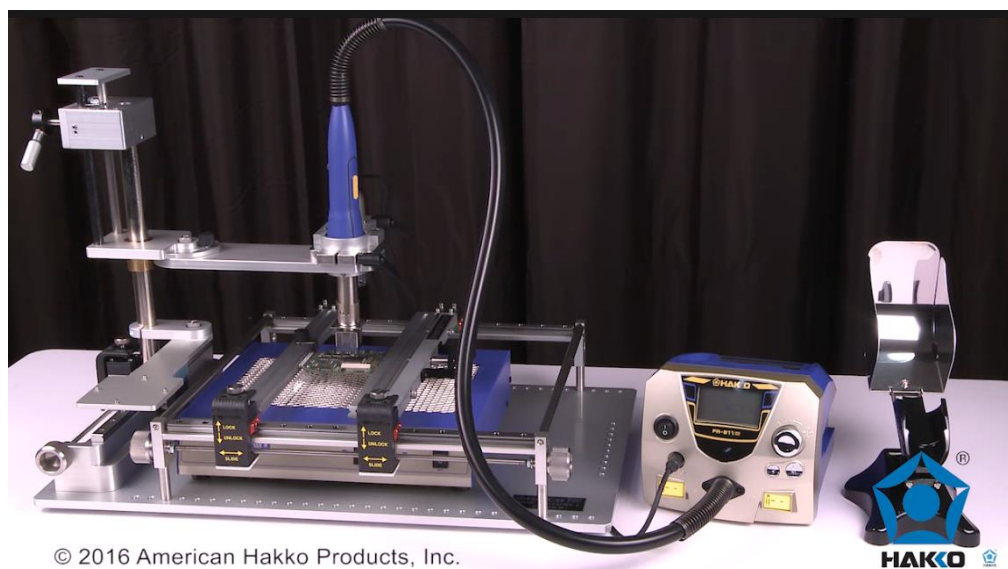
Stanice FR-811 od společnosti HAKKO umožňuje uzavřít vyměňovanou součástku, která má být podrobena výměně do prostoru pracovního nástavce, který zamezuje šíření extrémního množství tepla na okolní části opravované DPS. Tato stanice je v porovnání s předchozí konstrukčně jednodušší. Umožňuje však obdobně jako stanice Martin Expert 10.6 h<sub>xv</sub> propojení s počítačem a následné sledování teplotního profilu. K dispozici zde jsou však pouze dva termočlánky, kdy jeden snímá teplotu DPS a druhý teplotu součástky [11].

Princip činnosti stanice je zobrazen níže na obrázku 1.12. Uzavřením vyměňované součástky do vhodně vytvarovaného nástavce vznikne kolem takové součástky pec, do které je vháněn horký vzduch. S pouzdem je manipulováno obdobně jako v případě stanice Martin pomocí vakuového podavače [11].

Pro dosažení optimálnějšího teplotního profilu byl využit volitelný modul spodního přehřevu C5023. Jeho parametry důležité při srovnávání teplotních profilů jsou uvedeny v tabulce společně s parametry vlastní opravárenské stanice.



Obrázek 1.12: Princip ohřevu součástky stanicí HAKKO FR-811 [11]



Obrázek 1.13: Stanice HAKKO FR-811 [11]



Obrázek 1.14: Jednotka spodního předehřevu C5023 [13]

Tabulka 1.13 Parametry stanice FR-811 [12],[13]

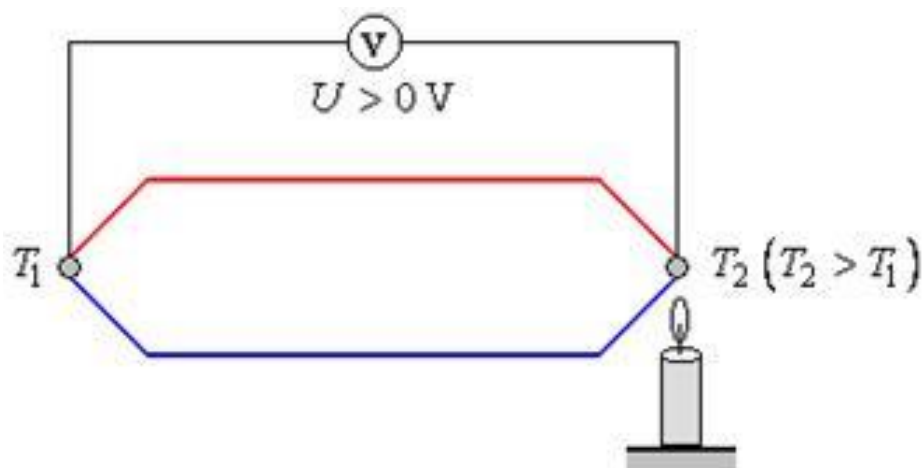
Stanice	
Průtok vzduchu	5 – 115 l/min
Rozměry stanice (šířka x výška x délka)	160 x 145 x 220 mm
Horkovzdušná pistole	
Rozsah teplot	50 – 600 °C
Délka	250 mm
Maximální výkon	1170 W
Spodní předehřev	
Maximální výkon	730 W
Rozsah teplot	50 – 250 °C

## 1.6 Měřicí pracoviště a vybavení

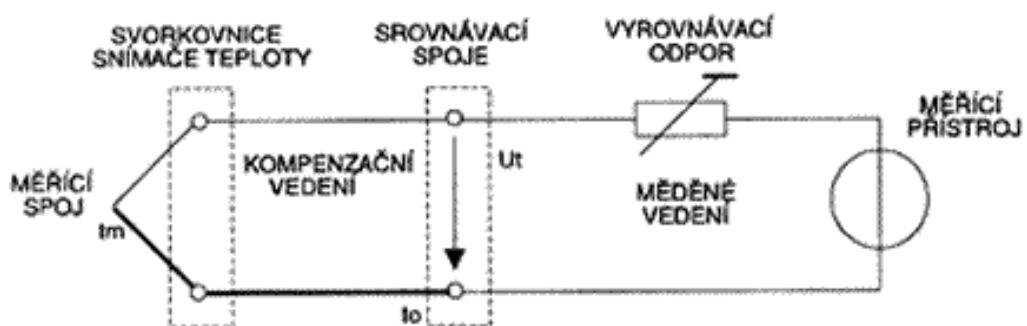
### 1.6.1 Termočlánky použité pro měření teplotních profilů

Pro snímání teploty (teplotních profilů) zkoumaných DPS osazených pouzdry BGA budou využity termočlánky snímané šestikanálovým profilometrem.

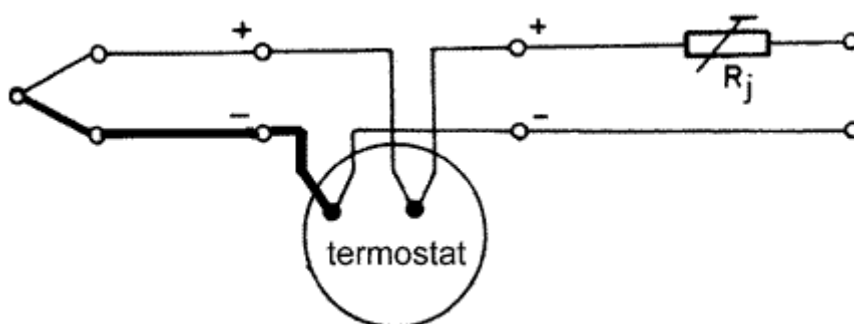
Termočlánky patří mezi elektrické snímače teploty, konkrétně termoelektrické, tedy využívající termoelektrického jevu (Seebeckova jevu). Termočlánek vzniká spojením dvou různých kovů či polovodičů. Pokud mají spojení těchto dvou kovů různou teplotu, vzniká rozdíl napětí. Rozpojíme-li takto vzniklý obvod na jednom konci, lze na tomto konci měřit termoelektrické napětí. Princip Seebeckova jevu je zobrazen na obrázku 1.15, na obrázku 1.16 je pak znázorněn schématicky princip měření teploty termočlánekem, tedy po rozpojení jednoho ze spojů.



Obrázek 1.15: Základní konstrukce termočlánku [14]



Obrázek 1.16: Schéma měření teploty pomocí termočlánku [15]



Obrázek 1.17: Měření pomocí dvou termočlánků [15]

Pro správné měření pomocí termočlánků je vhodné doplnit termočlánek srovnávacími spoji a vyrovnávacím odporem. Srovnávací spoje jsou spoje, jejichž teplota je udržována na známé konstantní hodnotě  $t_0$ . Jde tedy o teplotu referenční. Toto je zároveň nevýhodou tohoto typu měření, jelikož při neudržení konstantní teploty obou srovnávacích spojů dochází na spojích taktéž k termoelektrickému jevu a výsledná měřená hodnota se zkresluje s kolísáním teploty okolí [15]. Měřicí přístroj je následně připojen měděným vedením, u něhož je nutno kompenzovat vliv teploty na odpor tohoto vedení. Toho je docíleno začleněním vyrovnávacího odporu do této smyčky. Další nevýhodou také je, že závislost napětí, které je generováno termočlánekem na teplotě není lineární a tato závislost navíc není stejná pro různé typy termočlánků, proto bývají přístroje pro snímání napětí na termočlánek opatřeny korekcí pro daný typ termočlánku.

Pro eliminování nevýhody spočívající v nutnosti udržení stabilní referenční teploty srovnávacích spojů lze využít zapojení na obrázku 1.17. Termočlánky jsou zde v sériovém spojení, kdy se jejich napětí odečítají. Jeden termočlánek tak slouží jako referenční a druhý slouží k měření [15]. Tento způsob měření je však z praktického hlediska nevýhodný, proto se v praxi pro větší kompaktnost používá místo referenčního termočlánku polovodičový snímač teploty.

Pro zhotovení termočlánku se využívá různých materiálů, převážně kovů. Jedním z často zastoupených materiálů bývá železo, konstantan (Cu - Ni) či slitiny niklu a chromu (Ni - Cr). Objevuje se nicméně i platina, jako zástupce ušlechtilých kovů. Termočlánky jsou značeny písmeny B, E, J, K, N, S, R, T a liší se přesností měření, složením i teplotními rozsahy. Pro snazší identifikaci je zavedena barevná konvence pro jednotlivé typy termočlánků. Shrnuté parametry a značení jednotlivých termočlánků jsou zobrazeny na obrázku 1.18.

Pro praktickou aplikaci v případě této práce bude využito termočlánků typu K, které byly vybírány s ohledem na minimalizaci vlastních tepelných kapacit. S ohledem na zmíněné parametry byly vybrány termočlánekové sondy SRTC-TT-K, které vynikají malým průměrem termočlánku 0,13 mm. Izolace vlastního vedení je provedena z perfluoralkoxy - kopolymeru (PFA). Měření bude prováděno pomocí šesti termočlánků, které budou připojeny k šestikanálovému profiloměru.



TYP	MATERIÁL		MĚŘÍCÍ ROZSAH	PŘESNOST MĚŘENÍ		BAREVNÉ ZNAČENÍ IEC 584-3			BAREVNÉ ZNAČENÍ ANSI MC 90		
	+	-		Standart	Special	Konektor	Termočlánek	Prodlužovací vedení	Konektor	Termočlánek	Prodlužovací vedení
<b>B</b>	Pt 30%-Rh	Pt 6%-Rh	870 - 1700°C	±0,5%	±0,25%					NESPECIFIKOVÁNO	
<b>E</b>	Ni-Cr	Cu-Ni	-270°C - 0°C	±1,7°C nebo ±1,0%	-						
			0°C - 870°C	±1,7°C nebo ±0,5%	±1,0°C nebo ±0,4%						
<b>J</b>	Fe	Cu-Ni	0 až 760	±2,2°C nebo ±0,75%	±1,1°C nebo ±0,4%						
<b>K</b>	Ni-Cr	Ni-Al	-200°C - 0°C	±2,2°C nebo ±2,0%	-						
			0°C - 1260°C	±2,2°C nebo ±0,75%	±1,1°C nebo ±0,4%						
<b>N</b>	Ni-Cr-Si	Ni-Si-Mg	0 až 1260	±2,2°C nebo ±0,75%	±1,1°C nebo ±0,4%						
<b>R</b>	Pt 13%-Rh	Pt	0 až 1480	±1,5°C nebo ±0,25%	±0,6°C nebo ±0,1%					NESPECIFIKOVÁNO	
<b>S</b>	Pt 10% - Rh	Pt	0 až 1480	±1,5°C nebo ±0,25%	±0,6°C nebo ±0,1%					NESPECIFIKOVÁNO	
<b>T</b>	Cu	Cu-Ni	-200°C - 0°C	±1,0°C nebo ±1,5%	-						
			0°C - 370°C	±1,0°C nebo ±0,75%	±0,5°C nebo ±0,4%						

Obrázek 1.18: Ukázka složení a vlastností jednotlivých druhů termočláneků [16]

### 1.6.2 Šestikanálový profiloměr

Pro snímání teplot byl použit profiloměr se šesti kanály. Tento profiloměr je uzpůsoben ke snímání napětí na termočláncích a jejich převodu na teplotu, přičemž toto měření probíhá v reálném čase.



Obrázek 1.19: Použitý teplotní profiloměr se šesti kanály [17]

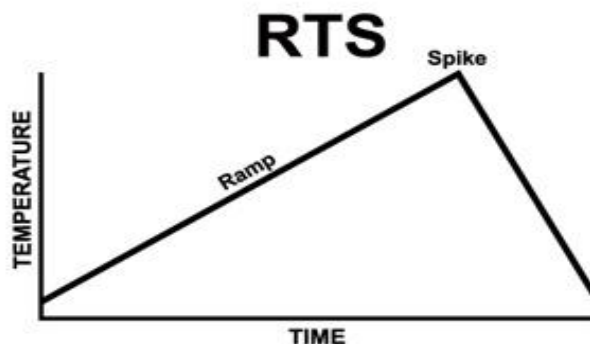
## 2. PRAKTICKÉ MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH PROFILŮ

### 2.1 Typický průběh pájecích profilů a jejich parametry

V praktické části této práce bylo řešeno porovnání pájecích profilů obou zařízení. V případě opravárenských procesů je tendence dosahovat pájecího profilu podobnému profilu přetavovací (reflow) pece.

#### 2.1.1 Lineární pájecí profil RTS

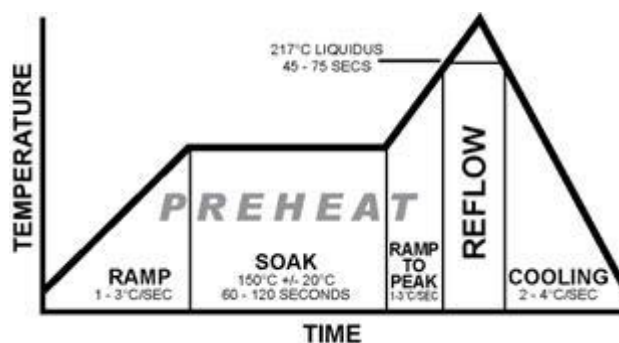
Tento profil je známý také pod pojmem RTS (Ramp To Spike). Jde o profil s lineárním nárůstem i poklesem teploty. Jde tedy o jednodušší pájecí profil, ve kterém teplota při ohřevu roste směrem k maximální teplotě lineárně s definovanou strmostí. Od této hodnoty pak teplota při chlazení opět lineárně klesá, strmost poklesu teploty v této oblasti bývá vyšší. Strmost nárůstu teploty při ohřevu bývá menší než u složitějšího RSS profilu, jelikož je nutné omezit vliv tepelného šoku na osazované součástky a DPS. Tento profil lze rozdělit na 3 základní oblasti. Jde o oblasti předehřevu, dobu nad teplotou liquidu (TAL) a oblast chlazení. Tyto a další parametry teplotních profilů jsou rozebrány v následujících kapitolách.



Obrázek 2.1: Průběh profilu RTS [18]

#### 2.1.2 Sedlový teplotní profil RSS

Profil RSS (Ramp-Soak-Spike) je oproti profilu RSS složitější a lze jej dělit na 4 základní oblasti. Jde o oblast předehřevu (preheat), ustálení teplot (soak), přetavení (reflow) a chlazení (cooling).



Obrázek 2.2: Průběh profilu RTS [19]

### 2.1.3 Význam jednotlivých zón a technologicky významné parametry

První dvě ze zmíněných zón v přetavovacím profilu jsou zóny předehřevu (preheat) a ustálení. Během předehřevu při použití profilu RTS teplota roste lineárně směrem k maximální teplotě. V případě RSS profilu roste lineárně k oblasti, kde dochází k vyrovnání teplot součástek s rozdílnými tepelnými kapacitami. Během předehřevu dochází k rovnoměrnému předehřívání DPS a odpařování těkavých rozpouštědel, které jsou obsaženy v pájecí pastě, respektive tavidlu. Setkáváme se zde s parametry velikosti náběhu teploty, která bývá udávána v jednotkách [ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ], dále zde bývá definována teplota předehřevu a maximální doba trvání předehřevu. Rychlost nárůstu teplot při ohřevu je důležitá zejména při použití součástek náchylných na větší změny teplot, kdy může docházet ke vzniku prasklin. Bez použití teplotně náchylných součástek výrobci volí agresivnější nárůst teploty až  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  [20].

Před samotným přetavením dochází k aktivaci tavidla, které má za úkol očistit povrchové oxidy a další nečistoty. Dochází také k vyrovnání rozdílů teplot mezi součástkami. Během této fáze může docházet k omezení vzniku bublin zejména v bezolovnatých procesech [20].

Zóna přetavení je nejdůležitější pro vznik pájených spojů, tedy vznik mechanicky pevného, elektricky vodivého spojení. Během tohoto spojení vznikají intermetalické sloučeniny, které mají významný vliv na spolehlivost a životnost pájeného spoje. Významnými parametry zde jsou maximální teplota (peak temperature) a čas strávený nad liquidem, který bývá označován jako TAL (Time Above Liquidus). Maximální teplota bývá typicky  $20 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  nad teplotou liquidu použité pájecí slitiny, parametr TAL pak bývá  $30 - 90\text{ s}$  [20].

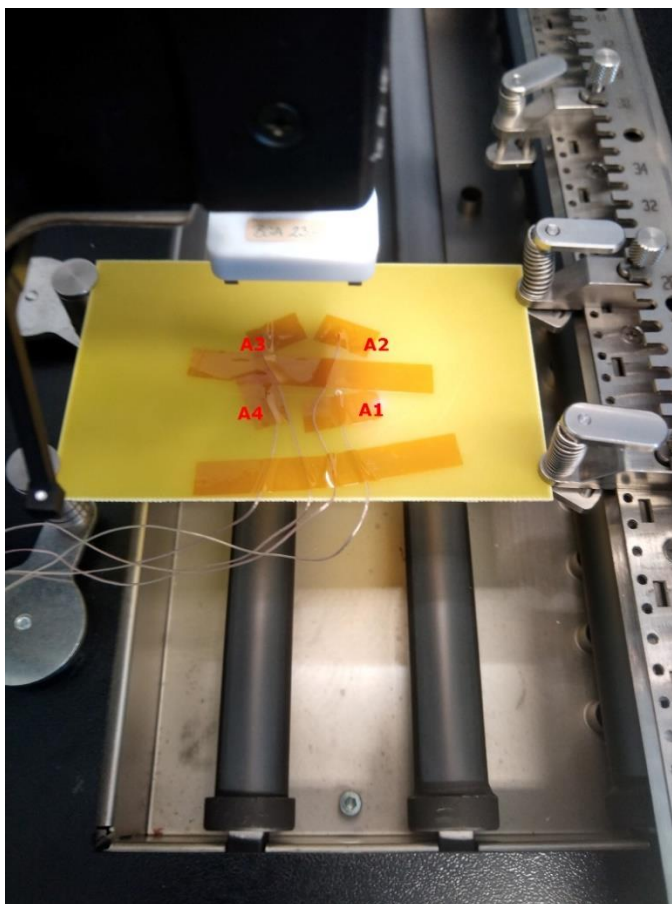
Poslední zónou je zóna chlazení. Rychlé ochlazení zde zajistí kvalitnější utváření spojů, jelikož vede k jemnější krystalické struktuře a omezuje nadměrný růst intermetalických struktur. Typická rychlost ochlazení bývá stanovena s ohledem na teplotní roztažnost komponent na  $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  [20].

Shrnutí významných parametrů:

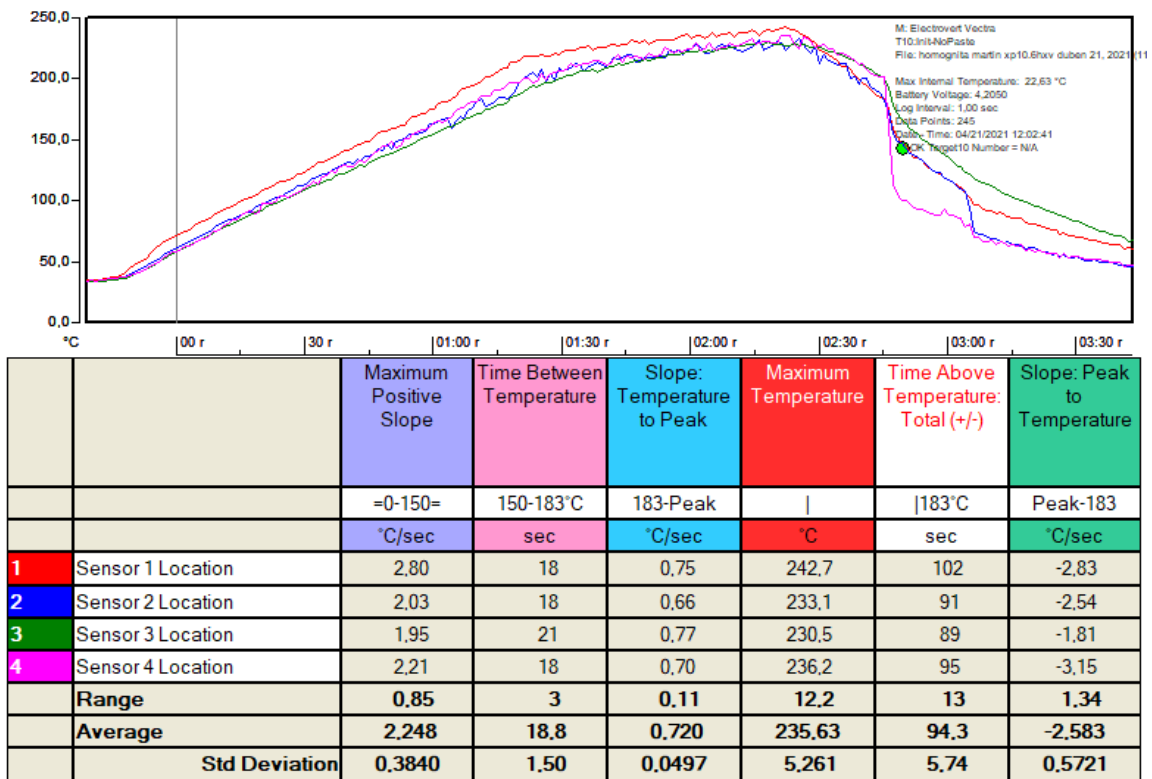
- Strmost náběhu teploty
- Teplota a doba přehřevu
- Strmost náběhu teploty mezi teplotou přehřevu a maximální teplotou
- Čas nad liquidem (TAL) a teplota liquidu
- Strmost teploty při ochlazování

## 2.2 Měření homogenity ohřevu použitých stanic

Úvodním pokusem bylo měření homogenity ohřevu obou stanic. Jako testovací vzorek byl využit přípravek se čtyřmi termočládky, které byly umístěny ve čtvercovém rozložení. Umístění termočládků a jejich označení (obrázek 2.3) odpovídá zapojení termočládků v profiloměru. Označení termočládků tedy koresponduje s naměřenými průběhy z programu MOLE MPA3, který byl použit pro měření teplotních profilů. Při ideálně homogenním ohřevu by na všech čtyřech termočládkách byla v každém okamžiku stejná teplota. Účelem tohoto měření je tedy zhodnocení velikosti odchylek teplot mezi jednotlivými termočládky a jejich následné porovnání v případě obou stanic.

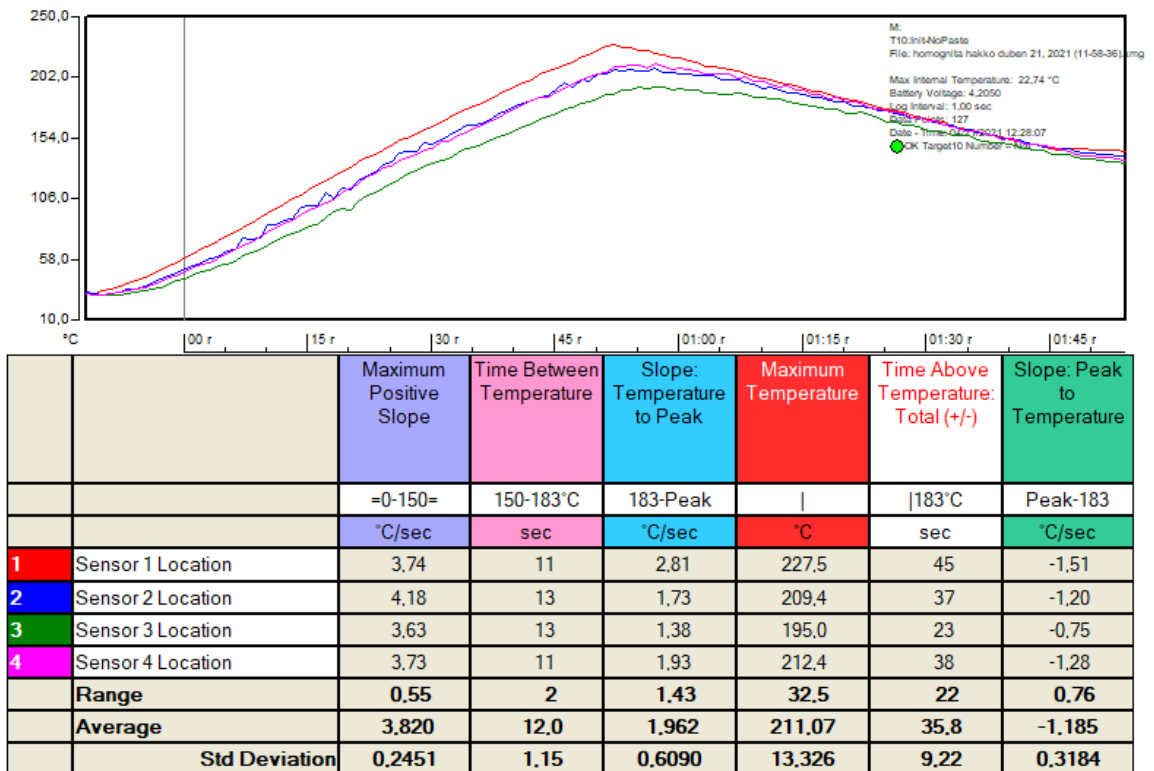


Obrázek 2.3: Přípravek pro měření homogenity ohřevu



Obrázek 2.4: Měření homogenity ohřevu stanice Martin

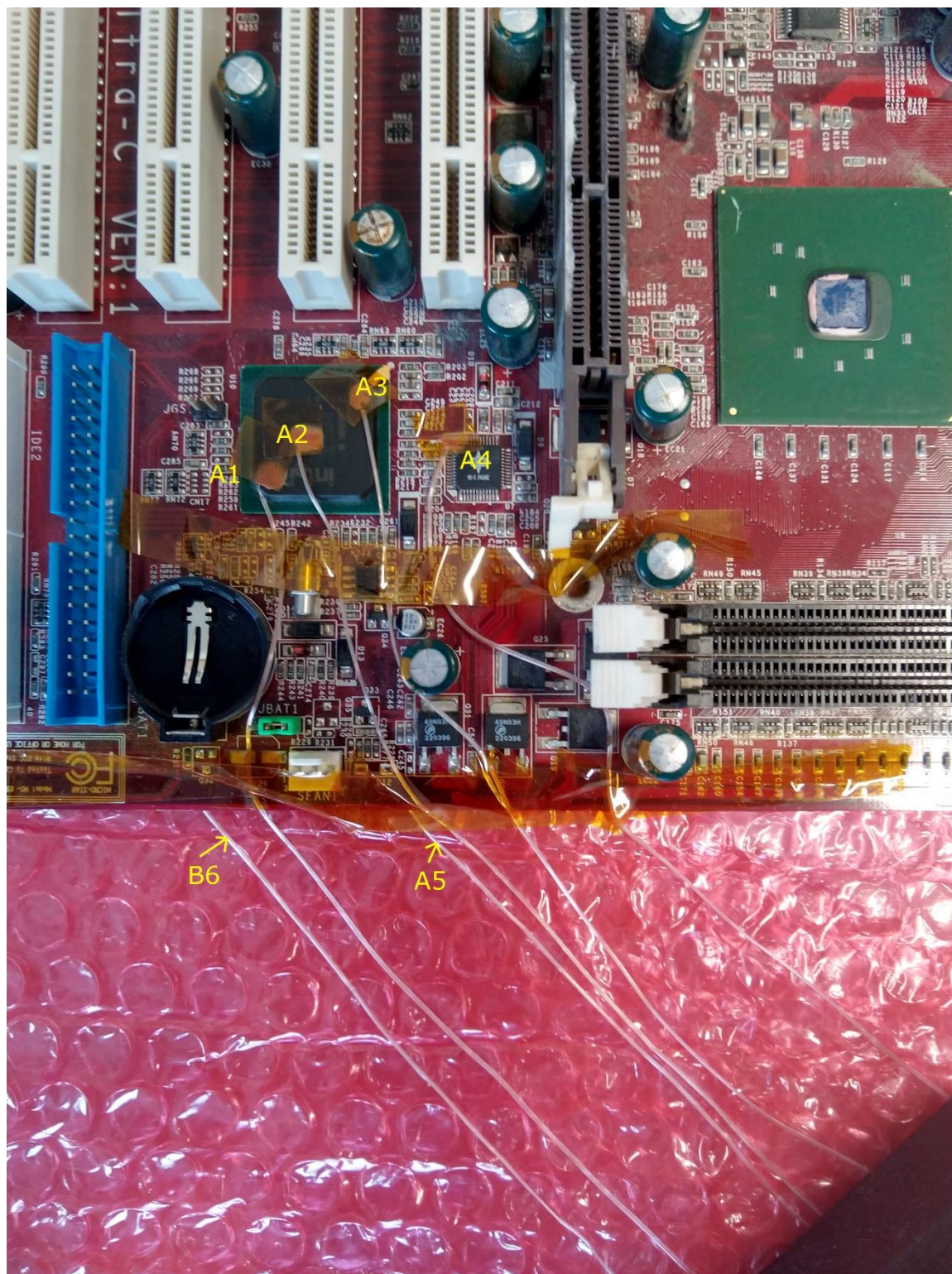
V případě měření homogenity ohřevu na stanici Martin jsou získané závislosti téměř v překryvu, výjimku tvoří průběh teploty na termočlátku A1, kde bylo dosaženo maximálního rozdílu teplot 12,2 °C. K výraznému odchýlení došlo v následné fázi chlazení, zde však může docházet k odchýlkám vzniklým rozdíly proudění vzduchu v oblasti vzorku při oddálení pracovního nástroje i vlastní změnou tlaku v místnosti. Vzniklá odchylka se projevila zejména na termočlátku A1 dle obrázku 2.3. Tento rozdíl teplot mohl být zapříčiněn i vlivem spodního předehřevu, jelikož v tomto případě byl termočlánek A1 umístěn nad středem jednotky spodního předehřevu, kde lze předpokládat vyšší tepelnou intenzitu. Naměřené hodnoty tedy vykazují jistou nesymetrii v homogenitě ohřevu, kdy byl ohřev silnější směrem k pravému dolnímu rohu vzorku (termočlánek A1). Vliv spodního předehřevu na tuto homogenitu byl však v následujících měřeních potlačen, jelikož testovací přípravek představovala DPS větších rozměrů. Testovaná oblast se tedy nacházela blíže středu spodního předehřevu než v případě měření homogenity na stanici Martin.



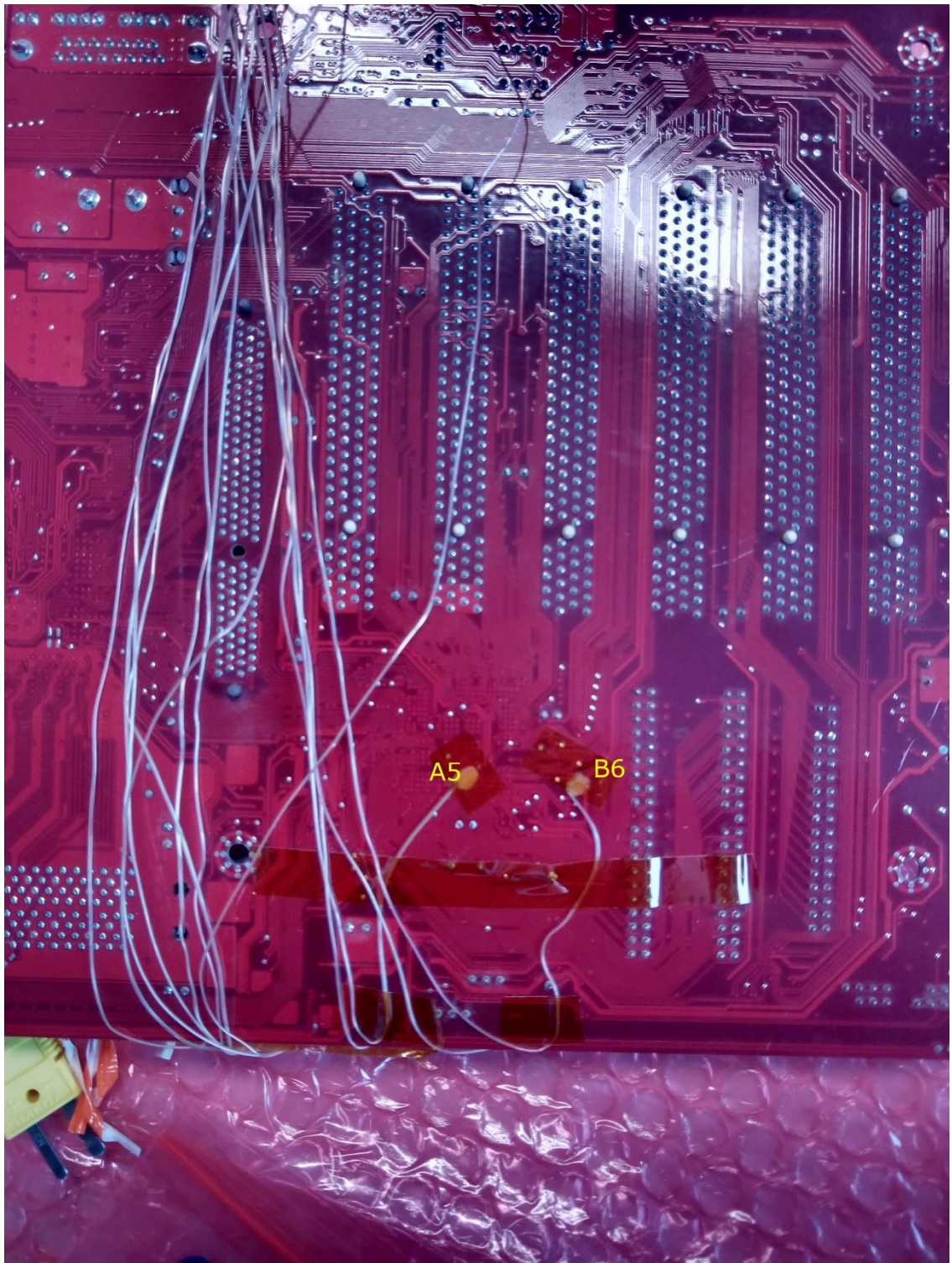
Obrázek 2.5: Měření homogenity ohřevu stanice Hakko

V případě měření homogenity ohřevu na stanici Hakko došlo k větším rozdílům teplot na jednotlivých termočláncích, výsledné průběhy mají tedy vzájemně větší odstup. Rozdíl teplot byl nejvíce markantní mezi termočlánci A1 a A3, kde rozdíly dosahovaly hodnot více než 30 °C. V případě druhé stanice se tedy projevila značná nesymetrie mezi levým horním a pravým dolním rohem vzorku, která činila až 32,5 °C. Lze tedy předpokládat, že největší intenzita tepla neleží ve středu vzorku, ale je posunuta směrem k pravému dolnímu rohu. Zmíněná skutečnost může být způsobena pravděpodobně i místem upevnění testovacího vzorku nad spodním předehřevem.

## 2.3 Měření a porovnávání teplotních profilů



Obrázek 2.6: Vrchní strana testovací DPS s označením termočlánků



Obrázek 2.7: Spodní strana testovací DPS s označením termočlánků



### 2.3.1 Upevnění termočlánků na testovacím přípravku

Při zhotovování přípravku pro měření teplotních profilů byly do pouzdra BGA předvrtány otvory vrtákem průměru 0,7 mm do hloubky přibližně 1 mm. Do otvorů byly následně osazeny termočlánky, které byly zafixovány elektroizolačním lepidlem. Konkrétně šlo o lepidlo Heraeus PD 955 PY, které je určeno k lepení součástek pro povrchovou montáž. Pro lepší fixaci termočlánků byl povrch lepidla překryt kaptonovou páskou. Postup u zbylých termočlánků na obou stranách DPS byl analogický. Vytvrzení adheziva probíhalo po dobu 3 minut za teploty 120 °C.

V úvodu měření teplotních profilů byla zjištěna závada jednoho z termočlánků, konkrétně šlo o termočlánek A3 v případě druhého testovacího přípravku na obrázku 2.6. Tento termočlánek byl před začátkem měření teplotních profilů nahrazen termočlánkem z přípravku pro měření homogenity ohřevu. Pro přilepení tohoto termočlánku však nebylo možné využít odpovídající lepidlo, jelikož nebylo na pracovištích firmy dostupné. Jako jediná dostupná alternativa byla zvolena tepelně vodivá pasta v kombinaci s polyimidovou páskou (obchodním názvem kaptonovou páskou). Parametry této pasty jsou shrnuty v tabulce 2.1.

Po upevnění termočlánku tímto způsobem a provedení testovacího měření bylo zjištěno, že daný termočlánek indikuje teploty výrazně vyšší než zbylé dva termočlánky umístěné ve stejné diagonále na vrchu pouzdra. Zmíněný fakt je důsledkem dvou faktorů. Prvním a významnějším z nich je vyšší hodnota tepelné vodivosti, než jaké dosahovalo lepidlo použité na ostatní termočlánky. Vliv zde má také vlastní tepelná kapacita spoje termočlánku, která je v tomto případě výrazně nižší. Druhým faktorem pak je samotný způsob uchycení termočlánku A3. Termočlánek upevněný výše zmíněným postupem nebyl kaptonovou páskou mechanicky upevněn se stejnou pevností jako v případě lepidla. Výsledkem mohl být mírný pohyb termočlánku v pastě, který mohl vést k přiblížení tohoto termočlánku blíže ke zdroji tepelné energie. Popsané skutečnosti však nelze přisoudit přílišné zkreslení, proto je za hlavní zdroj chyby považován první faktor.

V běžných podmínkách by nicméně bylo vhodné pro dosažení vyšší přesnosti měření využít tepelně vodivé pasty v kombinaci s lepidlem pro dosažení odpovídající fixace termočlánků. V tepelně vodivé pastě by v tomto případě byl vsazen termočlánek, pomocí lepidla by následně bylo zafixováno přírodní vedení, aby nedocházelo k vytažení či pohybu termočlánků při manipulaci s přípravkem. Další variantou by bylo použití speciálního elektroizolačního tepelně vodivého adheziva, ideálně na bázi epoxidových pryskyřic, tím by se eliminovala nutnost použití 2 různých hmot k upevnění termočlánků.

Tabulka 2.1 Parametry tepelně vodivé pasty

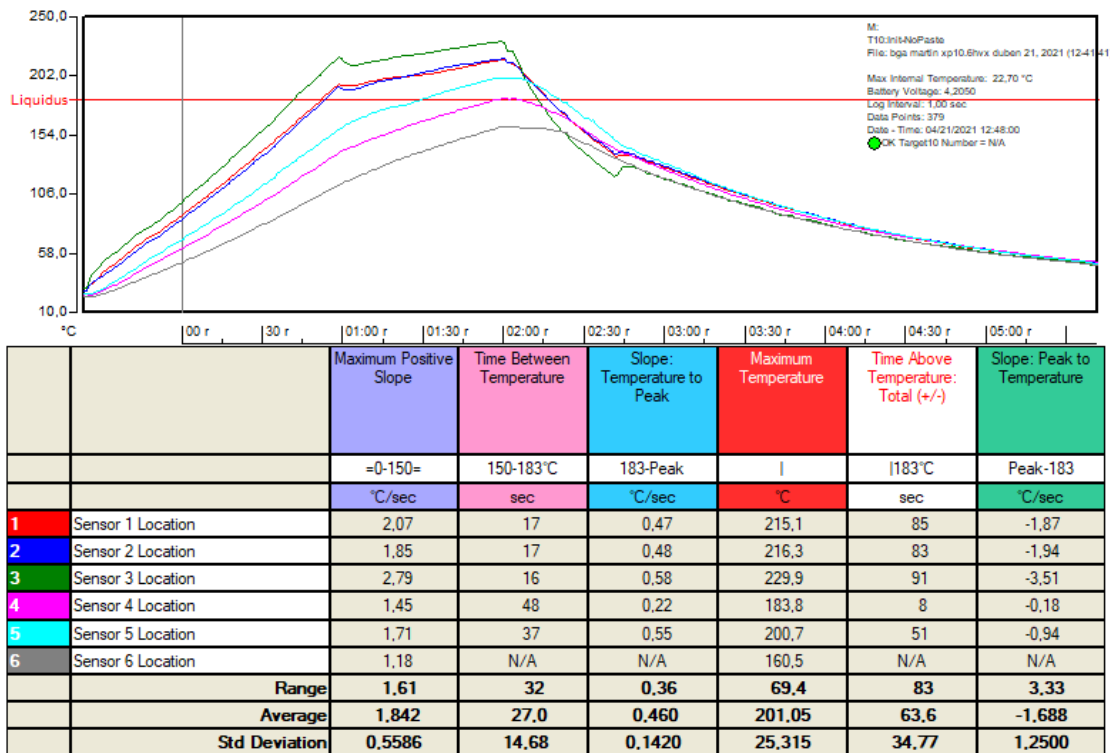
Výrobce	ELCHEMCo
Tepelná vodivost	0,67 W/mK
Objem balení	25 ml

### 2.3.2 Data naměřená na stanici Martin

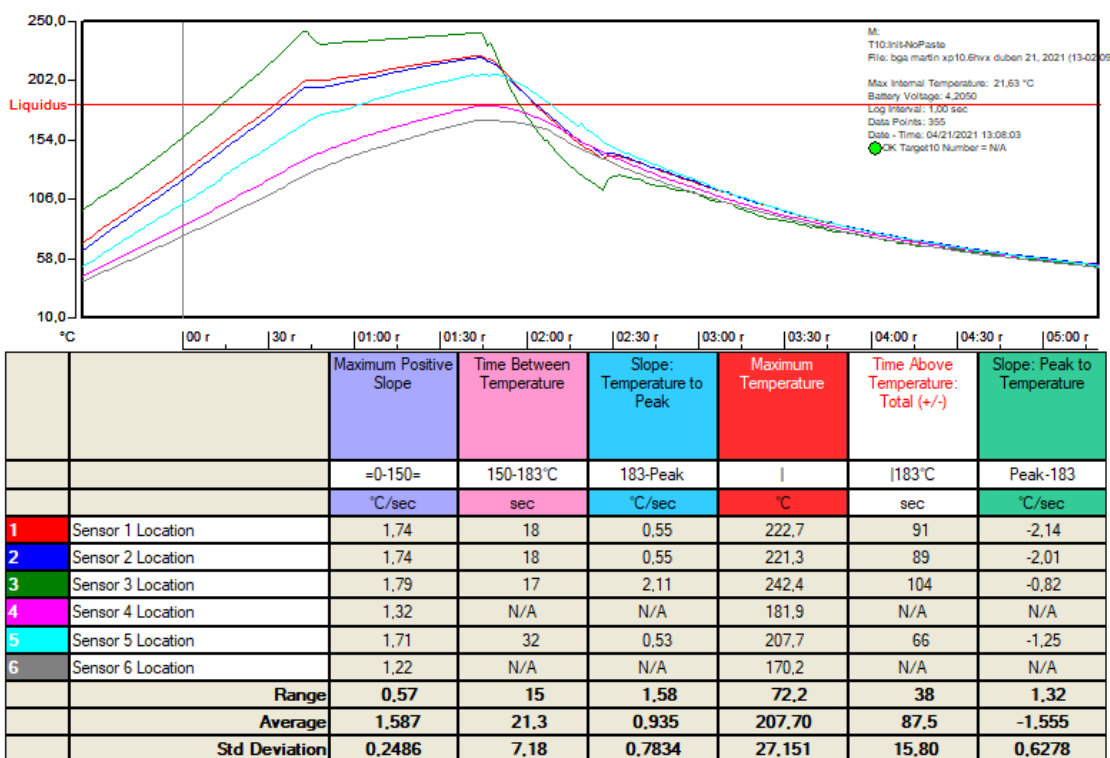
První měření teplotních profilů probíhalo na stanici Martin. Měřicí přípravek byl upevněn příslušnými úchyty tak, aby se pouzdro BGA nacházelo ve správné pozici pod pracovním nástrojem stanice. V tomto případě vzhledem k větším rozměrům desky již byla oblast s pouzdem BGA umístěna vhodněji, tedy přibližně mezi dvěma topnými zářiči spodního přehřevu. Nastavení teplotního profilu bylo ponecháno shodné s měřením homogenity a nastavené parametry jsou shrnuty v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2 Nastavení teplotního profilu stanice Martin

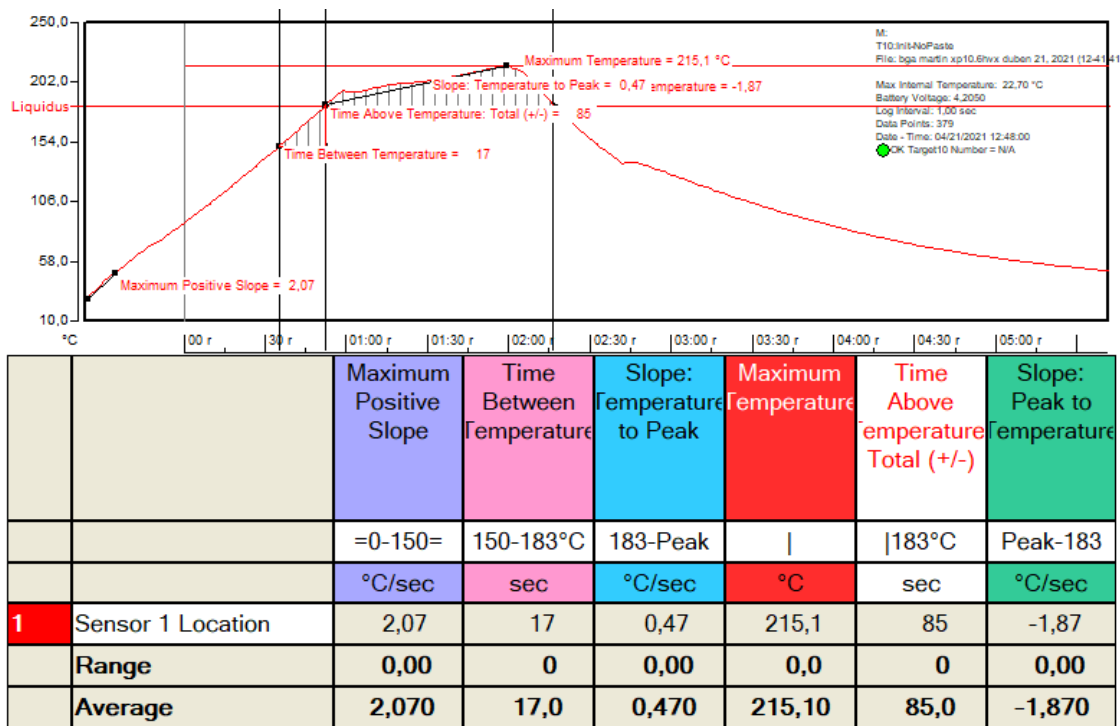
Spodní přehřev	Teplotní nárůst	Fáze pájení	Fáze ochlazování
Režim otevřené smyčky	Doba náběhu teploty 90 s	Doba přetavení 65 s	Průtok vzduchu 25 l/min
Maximální výkon 64 % (1200 W)	Teplota 250 °C	Teplota 250 °C	Chlazení součástky 40 s
Doba náběhu teploty 149 s	Průtok vzduchu 25 l/min	Průtok vzduchu 25 l/min	
3/8 aktivní zářiče	Počáteční teplota horního topného tělesa 80 °C	Maximální teplota horního topného tělesa 295 °C	
	Maximální teplota horního topného tělesa 365 °C		



Obrázek 2.8: Průběhy prvního měření na stanici Martin



Obrázek 2.9: Průběhy druhého měření na stanici Martin



Obrázek 2.10: Ukázka stanovování parametrů na samostatném průběhu (měření 1)

### 2.3.3 Vyhodnocení teplotního profilu v oblasti pouzdra BGA – stanice Martin

Z naměřených dat byl zjištěn nárůst teploty při ohřevu 1,74 - 2,79 °C/s. Tyto hodnoty odpovídají profilu, který bývá výrobcí obvykle volen a jehož nárůst teploty bývá do 3 °C/s.

Doba teplotního vyrovnání zde činila 16 – 18 s. Tato doba je poněkud kratší, při pájení přetavením bývá obvykle kolem 80 s. Předehřev je nicméně hodnocen dle přísnějších kritérií pro teplotní profil při přetavení, které zpravidla probíhá ve vícezónových pecích, u kterých lze teplotní profil lépe řídit. V tomto konkrétním případě jsou výsledné teplotní profily podobnější profilům RTS. Význam této oblasti profilu spočívá v omezení vzniku rozdílů teplot mezi různými součástkami, v tomto případě je v dané oblasti pouze pouzdro BGA a tento údaj tedy není kritickým parametrem.

Rychlost náběhu teploty na její maximální hodnotu činila 0,47 – 2,11 °C/s. Hodnota 2,11 °C/s zde působí výraznou odchylku nejen vůči zbývajícím termočládkům, ale i vůči průběhu na tomtéž termočládku A3 v případě druhého měření. Tato odchylka byla nejspíše způsobena nedostatečnou prodlevou mezi měřeními, kdy nedošlo k dostatečnému ochlazení celého přípravku. Tomu odpovídají i vyšší dosažené maximální teploty v případě druhého měření, kdy jejich velikost na lepených termočládkách činila 221,3 – 222,7 °C. Odchylka zde činila 1,4 °C. Maximální teploty na termočládku A3 se nicméně lišily až o 12,6 stupně ve prospěch druhého měření. Nejvyšší naměřená teplota dosáhla 242,4 °C, čímž došlo k překročení maximální dovolené teploty, která bývá volena maximálně 40 °C nad bod tavení pájky. Takto výrazné překročení se však projevilo pouze v případě druhého měření a

jeho příčina již byla nastíněna v tomto odstavci. Za zmínku zde stojí skutečnost, že spoje lepených termočlánků mají vyšší tepelnou kapacitu, než spoje s tepelně vodivou pastou. Termočlánek lepený lepidlem vykazuje tedy tepelné vlastnosti bližší pouzdru součástky, termočlánek upevněný v pastě naopak vypovídá spíše o teplotě vzduchu těsně nad pouzdrém.

Doba nad teplotou tavení pájky se udržovala v rozmezí 83 – 104 s. V praxi bývá tato doba volena do 90 s a překročena tedy byla jen v případě druhého měření, kde se však opět uplatnilo nedostatečné ochlazení přípravku mezi měřeními a s tím spojené rychlejší nárůsty teploty k bodu tavení.

#### **2.3.4 Vyhodnocení z pohledu okolních komponent – stanice Martin**

Z pohledu součástek na vrchní straně DPS jsou nejvíce relevantní data naměřená termočlánkem A4. Maximální dosažená teplota v tomto místě testovaného vzorku dosáhla 183,8 °C, tedy přibližně teplotu tavení pájky. Této teploty však bylo dosaženo pouze ve špičkové hodnotě a nelze zde tedy vyhodnocovat dobu strávenou nad bodem tavení pájky. Lze tedy konstatovat, že v tomto případě docházelo k většímu tepelnému namáhání okolních součástek. Na vině pravděpodobně byla konstrukce pracovní hlavy stanice Martin, která dle obrázku 2.3 obsahovala i po dotlačení k DPS mezery, jimiž mohlo teplo unikat do stran. Tento jev byl v případě stanice Hakko omezen, jelikož provedení pracovního nástroje dle obrázku 1.12 umožňuje unikání horkého vzduchu také vrchní stranou tohoto nástroje.

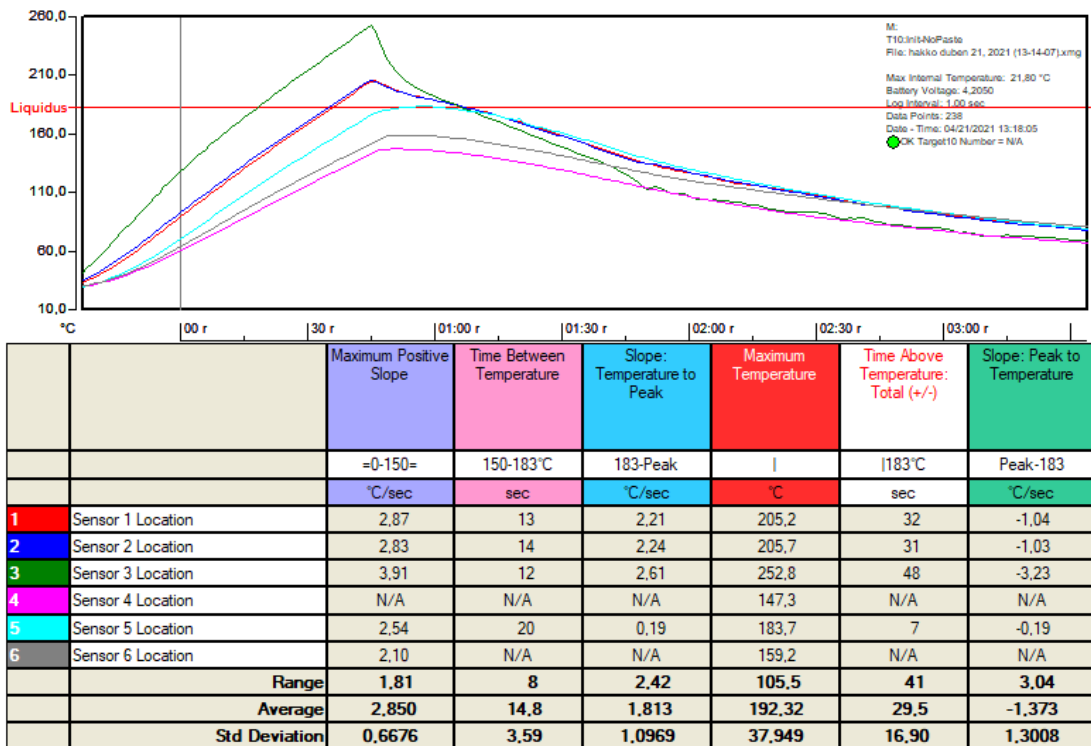
Pro spodní stranu DPS jsou nejvíce vypovídající termočlánky A5 a B6. V případě termočlánku A5 docházelo k intenzivnějšímu zahřívání oproti termočlánkům A4 a B6, jelikož se nacházel pod samotným pouzdrém BGA, které bylo osazeno na vrchní straně desky. Jednotlivé rychlosti náběhu teplot zde korespondují s hodnotami z povrchu pouzdra BGA, doba nad bodem tavení pájky činila minimálně 51 s. Maximální dosažená teplota zde náležela rozsahu 200,7 – 207,7 °C. Takto vysoké teploty byly způsobeny spodním předehřevem. Tyto teploty by bylo vhodné snížit pod teplotu přibližně 150 °C, aby nedocházelo k rekrystalizaci okolních pájených spojů. V tomto konkrétním případě teplota na spodní straně DPS překročila bod tavení pájky. Pokud by se na spodní straně desky nacházelo SMD pouzdro pájené přetavením, bylo by nutné tuto teplotu výrazně snížit. Teploty na termočlánku B6 pak dosahovaly nejmenších hodnot a byly tedy procesem výměny pouzdra BGA nejméně ovlivněny.

### 2.3.5 Data naměřená na stanici Hakko

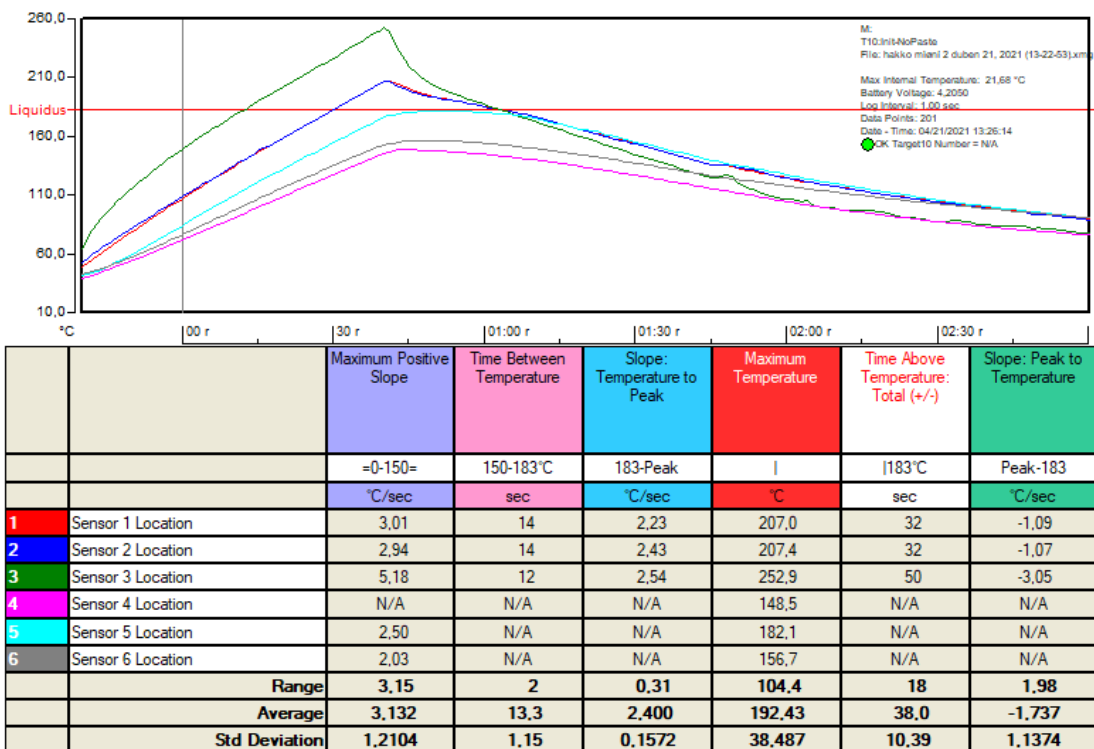
Testovací vzorek pro měření teplotních profilů byl po ochlazení přemístěn do upínacího aparátu stanice Hakko. Jednotka spodního předehřevu představuje v tomto případě samostatnou jednotku. Bylo proto nutné manuální upravení její polohy tak, aby byl vzorek lépe umístěn nad jejím středem. Měření na stanici Hakko bylo na doporučení zaměstnanců firmy prováděno v manuálním režimu, jelikož regulace v automatickém režimu způsobovala náhlé nárůsty a poklesy teplot v pájecím profilu, které by se v teplotním profilu projevovaly vznikem ramp v získaných grafech. Při měření byl využíván vlastní termočlánek stanice, který byl přidržován co nejbližší pouzdra BGA pod nástrojem. Účelem byla snaha přiblížit se teplotnímu profilu stanice Martin, který byl vnímán jako referenční. Alternativní postup měření, tedy v automatickém režimu by vyžadoval delší sérii měření s postupnými úpravami profilu.

Tabulka 2.3 Nastavení teplotního profilu stanice Hakko

Teplota horního tělesa	Průtok vzduchu	Výkon spodního předehřevu
365 °C	50 % (57,5 l/min)	75 % (547,5 W)



Obrázek 2.11: Průběhy prvního měření na stanici Hakko



Obrázek 2.12: Průběhy druhého měření na stanici Hakko

### 2.3.6 Vyhodnocení teplotního profilu v oblasti pouzdra BGA – stanice Hakko

Termočlánek A3 je opět zatížen chybou nastíněnou v kapitole 2.3.1. Nárůst teploty v začátku teplotního profilu nabývá u této stanice hodnot 2,83 – 5,18 °C/s. V průměru tedy došlo k překročení hodnoty 3 °C/s, která bývá využívána výrobcí v méně náchylných aplikacích. Takto rychlý nárůst teplot může zapříčinit vznik defektů v podobě prasklin v pouzdru či spojích. Dále může dojít k agresivní reakci některých tavidel. Při agresivní reakci tavidla nemusí tavidlo plnit svou funkci a může docházet ke vzniku nedokonalých spojů.

Doba předehřevu zde činila 12 – 14 s. Tato doba je srovnatelná s profilem změřeným na předcházející stanici. Tento parametr je však hodnocen stejným způsobem, jako v případě předcházející stanice a opět není kritickým.

Strmost náběhu na maximální teplotu zde činila 2,21 – 2,61 °C/s. Tato strmost je oproti měření na stanici Martin vyšší, tato skutečnost je nicméně způsobena vyšší lineárností profilu stanice Hakko.

Maximální dosažená teplota dosáhla hodnot těsně pod hranicí 253 °C. Tato hodnota je výrazně vyšší než hodnoty dosažené při měření na stanici Martin a překračuje teoreticky udávanou hranici 40 °C nad bodem tavení pájky, a to v obou měřeních. Příčinou může být méně dokonalá regulace ohřevu vzduchu či regulace průtoku vzduchu. Maximální teplotu je možno omezit upravením teplotního profilu a provedením dalších sérií měření již v automatickém režimu stanice.

Doba nad bodem tavení pájky se pohybovala od 31 do 50 s. Tyto hodnoty jsou teoreticky blíže spodní hranici doporučené doby 30 – 90 s. V případě použití této stanice je tedy vhodné provést kontrolu kvality vzniklých spojů. Výsledná kontrola kvality je však nutná v obou případech a bez podkladů z těchto zkoušek nelze jednoznačně určit případné nedostatky takového profilu.

### 2.3.7 Vyhodnocení z pohledu okolních komponent – stanice Hakko

Z výsledků měření byla zjištěna výrazná výhoda vlivu opravného procesu na okolní součástky u stanice Hakko, jelikož teploty naměřené na termočlánek A4 nabývaly nižších hodnot a průběhy lze považovat za pozvolnější. Teplota v oblasti termočlánek A4 byla ve svém maximu 40 °C pod bodem tavení pájky a nedosáhla tedy tohoto bodu, jako v případě měření na stanici Martin.

Teplota na termočlánek A5, tedy v oblasti pouzdra BGA na sekundární straně DPS dosahovala stejně jako v předcházejícím měření špičkových hodnot blízkých bodu tavení pájky. Průběhy teplot na spodní straně DPS zde byly pozvolnější a byly nižší než v případě stanice Martin. Pro kompenzaci rozdílu teplot na vrchní straně pouzdra a spodní straně DPS se tedy ukazuje vhodnější předehřev stanice Marin, který využívá ohřevu infračerveným zářením.



### 2.3.8 Diskuse dosažených výsledků

Z výsledků měření bylo zjištěno, že v případě obou stanic lze pozorovat jisté přednosti i nedostatky v teplotních profilech. Stanice Martin zde vynikala především dokonalejším spodním předehřevem, případné úpravy teplotních profilů je možné provádět v uživatelsky přívětivějším prostředí na obslužném počítači. Další z výhod představuje automatický optický systém pro vyjímání a pokládání vyměňovaných součástek. K tomu účelu využívá kamery s rozlišením 1944 x 2595 pixelů, která umožňuje pokládání součástek s přesností na 0,07 – 0,015 mm v závislosti na typu vyměňované součástky. Z naměřených hodnot lze dále vyzdvihnout nižší dosažené maximální teploty na pouzdru BGA, které lépe splňovaly teoretické limity. Mezi méně vhodné vlastnosti této stanice pak lze uvést výraznější vliv na okolní součástky, celkové rozměry stanice, vyšší pořizovací náklady.

Stanice Hakko vynikala zejména menším vlivem opravárenského procesu na okolní součástky, menšími rozměry celé stanice. Zápory pak lze nalézt v nutnosti dokoupení samostatné jednotky spodního předehřevu, uživatelsky méně vhodnou metodou úpravy nastavení teplotních profilů, které se provádí na terminálu stanice obslužnými tlačítky. Optimalizace teplotního profilu by zde vyžadovaly více měření, na základě kterých by byl profil postupně upravován. Tato skutečnost by vedla k prodloužení celkového času k dosažení spolehlivého procesu.

Tabulka 2.5 obsahuje některé z významných parametrů, které byly v případě obou stanic vyhodnocovány a tabulka 2.4 pak porovnává výhody a nevýhody obou stanic s využitím zkušeností získaných na pracovišti.

Tabulka 2.4 Porovnání výhod a nevýhod obou použitých stanic

Martin Exper 10.6 HXV		Hakko FR-811	
Výhody	Nevýhody	Výhody	Nevýhody
Obsluha přes PC	Vliv na okolní součástky	Vliv na okolní součástky	Komplikovanější obsluha
Více nastavitelných parametrů teplotních profilů	Rozměry	Rozměry	Náročnější optimalizace opravárenského procesu
Dokonalejší spodní přehřev	Požizovací náklady	Požizovací náklady	Absence spodního přehřevu v základní konfiguraci

Tabulka 2.5 Porovnání naměřených parametrů

Parametr	Martin Expert 10.6 h xv		Hakko FR-811	
	Měření 1	Měření 2	Měření 1	Měření 2
Maximální nárůst teploty ohřevu na součástce	2,79 °C/s	1,79 °C/s	3,91 °C/s	5,18 °C/s
Nejdelší doba mezi 150 a 183 °C	17 s	18 s	14 s	14 s
Maximální nárůst teploty ze 183 °C na špičkovou hodnotu	0,58 °C/s	2,11 °C/s	2,61 °C/s	2,54 °C/s
Maximální dosažená teplota na pouzdře	229,9 °C	242,4 °C	252,8 °C	252,9 °C
Maximální dosažená teplota na spodní straně DPS	200,7 °C	207,7 °C	183,7 °C	182,1 °C
Maximální dosažená teplota na okolní součástce	183,8 °C	181,9 °C	147,3 °C	148,5 °C
Maximální TAL	91 s	104 s	48 s	50 s
Maximální rychlost chlazení součástky	-3,51 °C/s	-2,14 °C/s	-3,23 °C/s	-3,05 °C/s

## 2.4 Shrnutí použité metodiky měření a vyhodnocování

### 2.4.1 Metodika měření

Použitá metodika je vhodná pro srovnávání různých opravárenských stanic pro použití v konkrétní opravárenské proceduře. V tomto případě se jednalo o výměnu pouzdra BGA na starším zařízení, tedy ještě v olovnatém procesu. Postup je však pro bezolovnaté pájení reprodukovatelný a je shrnut v bodech níže.

#### 1. Měření homogenity ohřevu

- a) Sestavení měřicího přípravku pro měření homogenity ohřevu.
- b) Upevnění vzorku do jedné ze stanic.
- c) Změření homogenity ohřevu jedné stanice pro eliminaci případných nedokonalostí ohřevu. V případě nutnosti lze zvýšit počet měření a při vzniku výraznějších odchylek v homogenitě ohřevu lze zkoumat například vliv natočení trysky s pájecím nástrojem jeho otáčením. Je-li to možno realizovat, vhodné je aplikování páteho měřicího termočlásku do středu vzorku, což vzhledem k celkovému počtu termočlásků na pracovišti nebylo v tomto případě možné. Dále je vhodné proměřit samostatně také homogenitu ohřevu jednotky spodního předeřevu. Vhodné je zaměřit se dále na kontrolu paralelnosti trysky s rovinou DPS a vzdálenosti trysky od DPS.
- d) Opakování postupu dle bodů b) a c) pro druhou opravárenskou stanicí.

#### 2. Měření teplotních profilů

- a) Sestavení testovacího vzorku, tedy DPS s vyměňovaným komponentem měřicí aparaturou dle obrázků 2.6 a 2.7. Dovoluje-li to výška vývodů BGA pouzdra, je vhodné umístit jeden z termočlásků také mezi tyto vývody. Dovoluje-li měřicí aparatura snímání více než 6 termočlásků, je vhodné umístit další termočlásky tak, aby byla měřena teplota ve všech rozích a středu pouzdra.
- b) Upevnění vzorku do první stanice a odpájení komponentu dle nastaveného teplotního profilu.
- c) Při kompletní výměně součástky je nutné následně opět vyhotovit stejný vzorek dle předcházejících bodů. V rámci testování a vyhodnocování teplotních profilů lze vyjmutí součásti vynechat a měření za tímto účelem provádět na stejném vzorku. V opačném případě je nutné provést očištění DPS od zbytků pájky a osazení nové komponenty. Alternativně lze ve fázi testování a měření provést pouze překuličkování (reballing) testovaného pouzdra BGA a opětovného osazení na DPS s cílem testovat pouze kvalitu pájených spojů, nikoliv funkčnosti takto opraveného zařízení.
- d) Opakování postupu dle bodů b) – c) pomocí druhé stanice.

### **3. Kontrola**

- a) Kontrola vzniklých spojů například pomocí rentgenových metod, optická kontrola osazení.

### **4. Zhodnocení opravárenského procesu**

- a) Vyhodnocení naměřených dat s ohledem na významné parametry pájecího procesu a parametry porovnávaných stanic.

#### **2.4.2 Náměty pro případné navazující práce**

Během měření byly získány některé cenné zkušenosti a poučení z vykonaných chyb. Mezi tyto poznatky a sugescce pro případnou opravu postupů měření patří:

- Osazení středového termočlánku na přípravek pro měření homogenity ohřevu, dovoluje-li to měřicí aparatura (počet možných připojení termočlánků) a dostupnost termočlánků. Využití více termočlánků v případě měření teplotních profilů, tedy za pomoci profiloměru s více než šesti kanály.
- Testování různých natočení pracovního nástroje stanic a samostatné měření homogenity spodního předeřevu.
- Jelikož jeden z termočlánků byl upevněn zmíněnou tepelně vodivou pastou, bylo by vhodné vyhotovit uchycení všech termočlánků jednotným způsobem. Navazující práce by mohla být zaměřena na srovnání teplotního profilu v oblasti pouzdra s profilem nastaveným, přičemž by termočlánky byly uchyceny tepelně vodivou pastou. Výsledkem by bylo získání informace o teplotě vzduchu těsně nad pouzdem BGA pro srovnání s nastavenou teplotou vzduchu. Následně by bylo uchycení termočlánků provedeno pomocí lepidla a vyhodnocován by byl vliv teplotního profilu na pouzdro BGA samotné.
- Provedení dlouhodobějšího měření za účelem optimalizace parametrů stanice Hakko s cílem provozovat tuto stanici v automatickém režimu.
- Porovnávání více stanic s různým principem ohřevu. Následné vyhodnocení s ohledem na vlastnosti vyměňované součástky (zejména barvě a materiálu pouzdra).
- Měření s obměnou pracovního nástroje stanice za účelem kompenzace například vlivu teploty na okolní součástky u stanice Martin.
- Provedení kontroly kvality pomocí optických a rentgenových metod po kompletní výměně součástky na každé ze stanic.
- Provedení funkčních testů po dokončení předcházejících operací.

### 3. ZÁVĚR

Účelem této práce je porovnat dvě opravárenské stanice z hlediska nastavování teplotních profilů pro pájení a odpájení součástek s většími tepelnými kapacitami, např. BGA.

V teoretické části práce je uvedení do základní problematiky pouzdření, demonstrace rozmanitosti pouzder, která jsou využívána v elektrotechnice. Dalším obsahem práce je podrobnější seznámení s pouzdry BGA, jejich konstrukčním uspořádáním, klady, zápory, ale i některými parametry.

V následující části této práce jsou probírány mechanismy přenosu tepla v pevných, kapalných a plynných látkách, definice základních veličin, se kterými se lze setkat nejen v oblasti pájení. Dále je zde uvedeno porovnání opravárenských stanic, které jsou využívány v praktické části této práce, měřicí aparatura, sestávající z profiloměru a termočlánků, jejichž druhy a vlastnosti jsou rovněž uvedeny v této práci.

Poslední celek této práce se zabývá problematikou měření teplotních profilů, používaných při pájení, která je využívána při následném porovnání naměřených profilů. Tento celek obsahuje naměřená a nastavená data a jejich vyhodnocení pro měření homogenity ohřevu stanic i pro následné měření teplotních profilů. Poslední kapitoly této práce se pak zabývají vyhodnocením teplotních profilů zejména z pohledu opravované součástky a vlivu na okolní součástky a DPS samotnou, závěrečným porovnáním obou použitých stanic a shrnutím použité metodiky měření. Porovnání parametrů je prováděno v samotném textu práce a některé významné parametry a kritéria hodnocení jsou zaneseny do příslušných tabulek v kapitole vyhodnocování výsledků měření.

Součástí shrnutí použité metodiky a závěrečného vyhodnocování je také odůvodnění některých nedokonalostí, zjištěných při měření a zhodnocení možných příčin. Shrnutí použité metodiky dále obsahuje některé úpravy, které by mohly vést ke zvýšení efektivity a vyšší výpovědní hodnoty podobných měření. Dále jsou zde shrnuty některé poznatky z měření a návrhy úprav kroků měření pro navazující práce.

Význam této práce spočívá zejména ve stanovení metodiky zkoumání pájecích profilů s ohledem na eliminaci případných chyb v nastavení profilů a vzniku defektů na opravované sestavě. Práce se zaměřením na opravárenské procesy mohou dále podněcovat k realizaci takovýchto oprav u větší škály zařízení a tím dlouhodobě přispívat k redukování množství elektronického odpadu během výrobního procesu i provozu zařízení.

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Zkratky:

BGA	...	Ball Grid Array
THT	...	Through-Hole Technology
THP	...	Through-Hole Package
DPS	...	Deska plošných spojů
SMT	...	Surface Mount Technology
SMP	...	Surface Mount Package
RTS	...	Ramp To Spike
RSS	...	Ramp-Soak-Spike
PFA	...	Perfluoralkoxy-kopolymer (Teflon)
TAL	...	Time Above Liquidus

### Symbols:

Q	...	teplo	[J]
TCE	...	koeficient teplotní délkové roztažnosti	$[\frac{1}{K}; \frac{ppm}{K}]$
l	...	délka	[m]
T	...	teplota	[K; °C]
$\sigma$	...	mechanické napětí	$[N \cdot m^{-2}]$
E	...	Youngův modul pružnosti v tahu	$[N \cdot m^{-2}]$
$\varepsilon$	...	poměrné prodloužení	[-]
c	...	měrná tepelná kapacita	$[\frac{J}{kg \cdot K}]$
$\Phi$	...	tepelný tok	[W]
q	...	hustota tepelného toku	$[W \cdot m^{-2}]$
d $\Phi$	...	změna tepelného toku	[W]
dS	...	jednotková plocha	[m <sup>2</sup> ]
dQ	...	množství tepla, které prošlo látkou	[J]
dt	...	změna času	[s]
$\lambda$	...	součinitel tepelné vodivosti	$[\frac{W}{m \cdot K}]$
A	...	plocha, kterou kolmo prochází tepelný tok	[m <sup>2</sup> ]
d	...	vzdálenost	[m]
$\Delta T$	...	rozdíl teplot	[K; °C]
$\alpha$	...	koeficient přenosu tepla	$[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$
A <sub>S</sub>	...	plocha, ze které dochází k výměně tepla	[m <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	...	relativní emise povrchu	[-]
E	...	emise reálného tělesa	[J]
E <sub>b</sub>	...	emise absolutně černého tělesa	[J]

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SZENDIUCH, Ivan. *Moderní trendy v pouzdření elektronických obvodů a systémů* [online]. [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/45400459-Moderni-trendy-v-pouzdeni-elektronicky-obvodu-a-systemu-modern-trends-in-electronic-circuits-and-systems-packaging.html>
- [2] The big list of electronic component and integrated circuit (IC) package types [online]. 2007, March 14 [cit. 2020-11-13]. Dostupné z: <https://www.geekslop.com/features/technology-articles/electronics/2017/the-big-list-of-electronic-component-and-integrated-circuit-ic-package-types>
- [3] Zig-zag in-line package. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020, 4 May 2020 [cit. 2020-12-5]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Zig-zag\\_in-line\\_package#/media/File:lc-package-ZIP.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Zig-zag_in-line_package#/media/File:lc-package-ZIP.svg).
- [4] ŠANDERA, Josef. *Návrh plošných spojů: pro povrchovou montáž*. Praha: BEN. ISBN 80-7300-181-0.
- [5] SZENDIUCH, Ivan. *Mikroelektronika a technologie součástek*. Brno, 2011. Učební text. Vysoké Učení Technické.
- [6] ŘEŘIČHA, Martin. *Historie moderní fyziky v úlohách*. České Budějovice, 2012. Dostupné také z: <https://theses.cz/id/r37vdv/1790787>. Bakalářská. Jihočeská Universita. Vedoucí práce Doc. RNDr. Josef Blažek, CSc.
- [7] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2392-3.
- [8] *Rework procedure for BGA modules* [online]. 2007 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/24636785/rework-procedure-for-bga-modules-application-note>
- [9] Martin Expert 10.6hvx, opravářská stanice BGA, BGA rework station [online]. 2020 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: [https://www.abetec.cz/data/Images/eshopproducts/big/expert-10-6-hvx\\_138425568508\\_474.jpg](https://www.abetec.cz/data/Images/eshopproducts/big/expert-10-6-hvx_138425568508_474.jpg)

- [10] *Katalogový list stanice Martin Expert 10.6 hxx* [online]. Německo, 2005 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.abetec.cz/eshop/productpdf/opravarenske-pracoviste-expert-10-6-hxx/>
- [11] *Hakko FR-811 Advanced SMD Rework System* [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=5v3INlvJIOM>
- [12] *HAKKO Desoldering / Rework/Hot-Air SMD Rework Station* [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: [https://www.hakko.com/english/products/hakko\\_fr811\\_set.html#productNav](https://www.hakko.com/english/products/hakko_fr811_set.html#productNav)
- [13] *Katalogový list spodního přehřevu C5023* [online]. Ostřešany, 2021 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.hakko.com/japan/contact/download.php?no=232>
- [14] REICHL, Jaroslav. Seebeckův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [15] KLEPÁRNÍK, Jan. *Termočlánky* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: [https://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn\\_tcl.htm](https://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_tcl.htm)
- [16] *Ardatech* [online]. Humpolec [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: [http://www.ardatech.cz/technicke\\_informace/](http://www.ardatech.cz/technicke_informace/)
- [17] *BakeWatch* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: [https://bakewatch.ecd.com/portals/0/Images/Products/BakeWATCH/SMG2\\_\(CAD\\_Top\)\\_200x200.jpg](https://bakewatch.ecd.com/portals/0/Images/Products/BakeWATCH/SMG2_(CAD_Top)_200x200.jpg)
- [18] *Ramp To Spike* [online]. 2009 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://profilingguru.com/wp-content/uploads/2009/02/rts-profile.jpg>
- [19] *Ramp-Soak-Spike* [online]. 2009 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: *Ramp-Soak-Spike* [online]. 2009 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://profilingguru.com/wp-content/uploads/2009/02/rts-profile.jpg>
- [20] *Profiling Basics. Indium Corporation* [online]. 2010 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.indium.com/blog/profiling-basics-reflow-phases.php>