



# 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

## KONTROLA A OPTIMALIZACE PÁJECÍCH PROFILŮ REFLOW PECÍ

INSPECTION AND OPTIMIZATION OF SOLDERING PROFILES OF REFLOW FURNACES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Milan Flos

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

BRNO 2022

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Milan Flos

**ID:** 221251

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Kontrola a optimalizace pájecích profilů reflow pecí**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Prostudujte odbornou literaturu z oblasti pájení přetavením. Zaměřte se na vliv teplotního profilu na kvalitu pájeného spoje. Navrhněte způsob a technické pomůcky pro praktické měření teplotních profilů ve výrobním procesu. Technické pomůcky navrhněte tak, aby vlastní měření co nejméně zasahovalo do procesu výroby. Realizujte soubor měření na výrobních linkách při stávajícím nastavení zařízení. Výsledky měření vyhodnoťte, identifikujte kritická místa a u problematických profilů navrhněte úpravu. Výsledky písemně a graficky zpracujte a diskutujte vliv průběhu pájecího profilu na kvalitu procesu.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 2.6.2022

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

**Konzultant:** Ing. Pavol Cabúk, PhD.

**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.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se věnuje realizaci řešení kontroly teplotních profilů v průmyslovém prostředí. V teoretické části je rozebrán samotný proces pájení, jednotlivé druhy pájení a jejich možné defekty. Dále zde byla rozebrána problematika teplotních profilů, jejich rozdělení, výhody a nevýhody jednotlivých profilů. Následně zde bylo provedeno měření na několika přetavovacích pecích a jeho vyhodnocení. Jako poslední byl vytvořen návrh držáku na profilometr a samotnou DPS.

## **Klíčová slova**

Teplotní profil, pájení přetavením, SAC305, pájecí pasta, životnost pájeného spoje, defekty při pájení

## **Abstract**

This thesis is focused on the implementation of solutions for the control of temperature profiles in an industrial environment. The theoretical part deals with the soldering process itself, individual types of soldering and their possible defects. Furthermore, the problem of temperature profiles, their division and the advantages and disadvantages of individual profiles were discussed. Subsequently, the measurement was performed on several remelting furnaces and its evaluation. Lastly, the design of the holder for the profilometer and the PCB itself was created.

## **Keywords**

Temperature profile, reflow soldering, SAC305, Solder paste, lifetime of solder joint

## **Bibliografická citace**

FLOS, Milan. Kontrola a optimalizace pájecích profilů reflow pecí. Brno, 2022.  
Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141636>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce doc. Ing. PETR Bača, Ph.D.

## Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Milan Flos</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>221251</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Bakalářská práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2021/22</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Kontrola a optimalizace pájecích profilů reflow pecí</i>

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: 23. května 2021

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Bačovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Pavlu Cabúkovi Ph.D. za velmi vstřícnou pomoc a cenné rady.

V Brně dne: 23. května 2021

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	9
SEZNAM TABULEK.....	10
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>2. PROCES PÁJENÍ .....</b>	<b>12</b>
2.1 PÁJKA.....	12
2.1.1 Pájecí pasta.....	12
2.1.2 Tavidlo .....	13
2.1.1 Olovnaté pájecí pasty.....	14
2.1.2 Bezolovnaté pájecí pasty.....	14
2.1.3 Příměšové materiály v pájce.....	15
2.2 INTERMETALICKÁ FÁZE.....	15
2.2.1 Stárnutí Intermetalické vrstvy.....	16
2.3 SMÁČIVOST .....	16
2.4 DIFÚZE.....	17
<b>3. TEPLOTNÍ PROFIL .....</b>	<b>18</b>
3.1 SEDLOVÝ TEPLOTNÍ PROFIL.....	18
3.2 LINEÁRNÍ TEPLOTNÍ PROFIL.....	19
3.3 PŘÍČNÝ TEPLOTNÍ PROFIL .....	19
3.4 ZÓNY V TEPLOTNÍM PROFILU.....	20
3.4.1 Oblast přehřevu.....	20
3.4.2 Oblast vyrovnání.....	20
3.4.3 Oblast přetavení.....	20
3.4.4 Oblast chlazení.....	20
3.5 MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO PROFILU .....	20
3.5.1 Termočlánky.....	21
<b>4. DEFEKTY PO PÁJENÍ PŘETAVENÍM.....</b>	<b>22</b>
<b>5. POVRCHOVÉ ÚPRAVY .....</b>	<b>24</b>
5.1 IMERZNÍ CÍN (IMSN).....	24
5.2 IMERZNÍ ZLATO (ENIG).....	24
5.3 ORGANICKÁ KONZERVAČNÍ LÁTKA (OSP) .....	24
5.4 HAL (HOT AIR LEVELLING) .....	24
<b>6. PŘETAVENÍ PÁJECÍ PASTY .....</b>	<b>26</b>
6.1 PÁJENÍ INFRAČERVENÝM ZÁŘENÍM .....	26
6.2 PÁJENÍ V PARÁCH.....	27
6.3 KONVEKČNÍ PÁJENÍ.....	27
6.4 PROFILOMETR SUPERM.O.L.E. GOLD 2.....	29
<b>7. VYTVOŘENÍ KONTROLNÍCH PARAMETRŮ .....</b>	<b>30</b>
<b>8. MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH PROFILŮ .....</b>	<b>32</b>
8.1 TEPLOTNÍ PROFIL TP1 MĚŘENÝ NA PŘETAVOVACÍ PECI Ersa 2/12 .....	35
8.2 TEPLOTNÍ PROFIL TP2 MĚŘENÝ NA PŘETAVOVACÍ PECI Ersa 2/12 .....	37

8.3	TEPLOTNÍ PROFIL TP3 MĚŘENÝ NA PŘETAVOVACÍ PECI ERS A 2/12 .....	38
8.4	TEPLOTNÍ PROFIL TP1 MĚŘENÝ NA PŘETAVOVACÍ PECI ERS A 3/14 .....	40
8.5	TEPLOTNÍ PROFIL TP2 MĚŘENÝ NA PŘETAVOVACÍ PECI ERS A 3/14 .....	42
8.6	TEPLOTNÍ PROFIL TP3 MĚŘENÝ NA PŘETAVOVACÍ PECI ERS A 3/14 .....	43
8.7	TEPLOTNÍ PROFIL TP1 MĚŘENÝ NA PŘETAVOVACÍ PECI ERS A 4/14 .....	45
8.8	TEPLOTNÍ PROFIL TP2 MĚŘENÝ NA PŘETAVOVACÍ PECI ERS A 4/14 .....	46
8.9	TEPLOTNÍ PROFIL TP3 MĚŘENÝ NA PŘETAVOVACÍ PECI ERS A 4/14 .....	47
<b>9.</b>	<b>MĚŘENÍ PŘÍČNÉHO TEPLOTNÍHO PROFILU .....</b>	<b>49</b>
9.1	PŘÍČNÝ TEPLOTNÍ PROFIL MĚŘENÝ NA PŘETAVOVACÍ PECI ERS A3/14 .....	50
9.2	PŘÍČNÝ TEPLOTNÍ PROFIL MĚŘENÝ NA PŘETAVOVACÍ PECI ERS A4/14 .....	51
9.3	PŘÍČNÝ TEPLOTNÍ PROFIL MĚŘENÝ NA PŘETAVOVACÍ PECI ERS A2/12 .....	52
<b>10.</b>	<b>NÁVRH DRŽÁKŮ PRO MĚŘENÍ .....</b>	<b>53</b>
10.1	DRŽÁK PROFILOMETRU SUPERM.O.L.E. GOLD2 .....	53
10.2	DRŽÁK DPS .....	54
<b>11.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>56</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>61</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1	Struktura pájecí pasty SAC305 [4].....	13
Obrázek 2.2	Intermetalická sloučenina na rozhraní pasty SAC305 a měděného povrchu substrátu [5]....	16
Obrázek 3.1	Sedlový teplotní profil.....	18
Obrázek 3.2	Lineární teplotní profil .....	19
Obrázek 4.1	Defekt bridging [10].....	22
Obrázek 4.2	Defekt solder balling [12].....	22
Obrázek 4.3	Defekt tombstoning [11].....	22
Obrázek 4.4	Head on pillow defekt [13].....	23
Obrázek 4.5	Snímek defektu z rentgenu [13].....	23
Obrázek 5.1	Struktura povrchových úprav, zprava imerzní zlato, imerzní cín a olovnatý HAL [14].....	25
Obrázek 6.1	IR přetavovací pec 4,5 kW [23].....	26
Obrázek 6.2	kondenzační pec CX 600/800 [8] .....	27
Obrázek 6.3	Inline pec Ersa HOTFLOW 4/14 [6].....	28
Obrázek 6.4	Profilometr SuperM.O.L.E. Gold 2 [28] .....	29
Obrázek 8.1	Validační DPS používána pro měření teplotních profilů.....	34
Obrázek 8.2	Teplotní profil TP1 měřený na peci Ersá 2/12.....	35
Obrázek 8.3	Teplotní profil TP2 měřený na peci Ersá 2/12.....	37
Obrázek 8.4	Teplotní profil TP3 měřený na peci Ersá 2/12.....	38
Obrázek 8.5	Teplotní profil TP1 měřený na peci Ersá 3/14.....	40
Obrázek 8.6	Teplotní profil TP2 měřený na peci Ersá 3/14.....	42
Obrázek 8.7	Teplotní profil TP3 měřený na peci Ersá 3/14.....	43
Obrázek 8.8	Teplotní profil TP1 měřený na peci Ersá 4/14.....	45
Obrázek 8.9	Teplotní profil TP2 měřený na peci Ersá 4/14.....	46
Obrázek 8.10	Teplotní profil TP3 měřený na peci Ersá 4/14.....	47
Obrázek 9.1	DPS použitá na měření příčného teplotního profilu .....	49
Obrázek 10.1	Návrh držáku pro profilometr SuperM.O.L.E. Gold 2 .....	54
Obrázek 10.2	Držák DPS .....	55

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Teplotní rozdíly jednotlivých pájecích past .....	15
Tabulka 7.1 Doporučené hodnoty pro jednotlivé pájecí pasty .....	30
Tabulka 7.2 Nastavené kontrolní parametry pro bezolovnaté a olovnaté pájecí pasty .....	31
Tabulka 8.1 Důležitých parametrů přetavovacích pecí .....	32
Tabulka 8.2 Nastavené hodnoty pro jednotlivé teplotní profily na přetavovací peci Ersa 2/12 .....	33
Tabulka 8.3 Nastavené hodnoty pro jednotlivé teplotní profily na přetavovací peci Ersa 3/14 .....	33
Tabulka 8.4 Nastavené hodnoty pro jednotlivé teplotní profily na přetavovací peci Ersa 4/14 .....	33
Tabulka 9.1 Příčný teplotní profil Ersa 3/14 .....	50
Tabulka 9.2 Příčný teplotní profil Ersa 4/14 .....	51
Tabulka 9.3 Příčný teplotní profil Ersa 2/12 .....	52

# 1. ÚVOD

Průmyslové pájení vyžaduje kvalitní a bezchybný pájený spoj, proto je nutné držet vysoké standardy všech výrobních procesů a dodržovat předepsané normy. Jeden z procesů, který je nutné kontrolovat je samotné přetavení pájecí pasty v reflow peci. Tato bakalářská práce se bude zabývat právě kontrolou teplotního profilu a teoretickým návrhem průmyslového řešení této kontroly.

Nastavení správného teplotního profilu je klíčem úspěchu pro dosažení kvalitního spoje s dlouhou životností. Pro lepší pochopení této práce byl vypracován stručný úvod do problematiky pájení. V prvních kapitolách jsou vysvětleny základní pojmy, například samotný proces pájení, rozdělení teplotních profilů, různé druhy defektů, které mohou vzniknout při pájení, možnosti povrchových úprav DPS a možnosti přetavení pájecí pasty.

Praktická část bakalářské práce se bude skládat z několika měření teplotních profilů. Na třech různých přetavovacích pecích, kterými firma disponuje, budou změřeny tři nejpoužívanější nastavení. Změřené podélné teplotní profily budou vyhodnoceny a případné chyby opraveny. Toto vyhodnocení bude moct využít nový technolog jako návod pro úpravu chybných teplotních profilů. Měření by mělo přispět k přesvědčení vedení firmy o přechodu na měření jednotlivých teplotních profilů přímo na konkrétní vyráběné DPS a ne pouze pomocí jedné validační DPS.

V další části bude provedena kontrola homogenity pájecích pecí pomocí změřením příčného teplotního profilu v každé z nich.

Jako poslední bude proveden návrh přípravku pro měření teplotního profilu. Bude navrhnout přípravek pro uchycení profilometru a pro uchycení samotné DPS, takže bude možné změřit teplotní profil téměř jakkoliv velké DPS.

## 2. PROCES PÁJENÍ

Pájení se nazývá proces, při kterém dojde ke spojení dvou nebo více kovových částí roztavenou slitinou. Slitina musí mít nižší bod tavení než spojované části. Pájení se dělí podle teploty tavení na měkké a tvrdé, podle způsobu na strojní a ruční. V mikroelektronice z velké části převažuje měkké strojní pájení, ruční pájení se používá pouze při opravách, buď při malých sériích nebo při pájení speciálních součástek, pro které by byla teplota v peci deformační (např. konektory). Tvrdé pájení je zejména používáno pro spojování mechanických a konstrukčních částí. Při pájení vývodů součástek a vodičů se užívá měkkého pájení. Pro vytvoření správného spoje je nutné dobré smáčení pájeného povrchu roztavenou pájkou a vhodné množství pájky. Povrch pájky by měl být hladký, lesklý a spojitý. Při prvním styku roztavené pájky s povrchem spojovaného materiálu dochází k smáčení, na ploše styku vznikají mezifázová rozhraní, kde přechází atomy roztaveného kovu pájky do krystalické mřížky tuhého kovu (Cu). Následně dochází k difúzi spojovaných kovů. Difúze je závislá na teplotě a vede k vytváření intermetalické sloučeniny, která se může vlivem teplotního stresu rozšiřovat. Tato vrstva má negativní dopad na elektrické i mechanické vlastnosti pájeného spoje. V další fázi dochází ke chlazení vzniklého spoje, kde začíná pájka krystalizovat. Při příliš pomalém ochlazení dochází ke znehodnocení pájeného spoje v podobě vytvoření větších zrn ve struktuře pájky, při příliš rychlém ochlazení se zvyšuje pravděpodobnost tvorby voidů a prasklin [1].

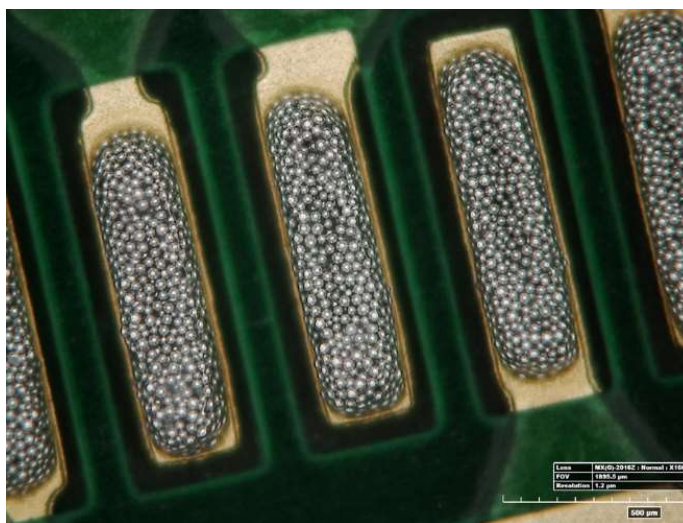
### 2.1 Pájka

Pájka se dá rozdělit podle formy, v kterém technologickém procesu bude užitá.

- Pájka v podobě pájecích tyčí se používá při procesu pájení vlnou, kde je pro funkční proces nutné velké množství roztavené pájky v oběhu čerpadla [1].
- Drátové pájky, může se jednat o pájecí drát nebo trubičkový drát vyplněný tavidlem. Vyrábí se v různých průměrech a používá se převážně pro ruční pájení [1].
- Pájecí pasta, viskózně-elastická kapalina. Pájecí pasta se skládá z práškové pájky, gelového tavidla a reologických modifikátorů. Pastu můžeme dělit podle viskozity a složení pasty. Pájecí pasta se nejvíce používá při sériové výrobě [1].

#### 2.1.1 Pájecí pasta

Pájecí pasta se používá pro technologii pájení přetavením (reflow soldering). Díky pájecí pastě se může výrazně zvýšit reprodukovatelnost daného spoje a to díky nanesení přesně definovaného množství pájecí pasty, což je v sériové výrobě velmi žádané. Pájecí pasty se dělí podle jejich složení a viskozity. Například pro dispenzní dávkovač musí být viskozita nižší než pro síťotisk nebo šablonový tisk [1].



Obrázek 2.1 Struktura pájecí pasty SAC305 [4]

### 2.1.2 Tavidlo

Tavidlo má několik nepostradatelných vlastností. Urychluje smáčecí proces, odstraňuje nečistoty, snižuje povrchové napětí pájecí slitiny, zvyšuje povrchové napětí pájeného povrchu, odstraňuje oxidy ze spojovaných povrchů, chrání je proti reoxidaci a zlepšuje přenos tepla. Z ekonomických a ekologických důvodů se nejvíce používají bezoplachová tavidla na bázi pryskyřic [1][3].

Tavidlo lze rozdělit do několika druhů: Organická (OR), Anorganická (IN), Resin (RE) a Rosin (RO).

Přesné složení tavidla je většinou obchodní tajemství daného výrobce, nejdůležitějšími základními složkami tavidla jsou: aktivátory, rozpouštědlo a tixotropní činidla. Tyto složky určují reologické a smáčivé vlastnosti pájky. Pro správnou funkci tavidla v pájecí pastě je nutné před použitím pájecí pastu kvalitně promíchat, aby došlo k homogennímu rozložení všech složek pájecí pasty. Zpravidla se používají míchací stroje, kde je nádoba s pastou uchycena a po určitý čas míchána (1-2 h), je tak zajištěno i dosažení pokojové teploty. Ideální tavidlo by mělo velmi spolehlivě odstraňovat oxidové filmy na plošce a součástce. Dále by mělo být lehce tepelně aktivovatelné s dlouhou dobou životnosti, které nebude zanechávat žádné zbytky a DPS se nebude muset čistit.

Rozpouštědla usnadňují nanášení pájecí pasty, která by se měla by se kompletně odstranit ve fázi predehřátí. Pokud by k tomu nedošlo, mohla by při zvýšené teplotě přejít do varu a rozstříkat roztavenou pájku.

Aktivátory se dělí podle síly, na vysoce aktivní a mírně aktivní. Po dosažení určité teploty aktivátor narušuje a rozpouští nežádoucí oxidy na pájecích plochách. Vysoce aktivní aktivátory obsahují halogenidy kovů, nejsou proto vhodné pro no-clean tavidla. Pokud by nebyly odstraněny, mohou narušit a zdegradovat nově vzniklý pájený spoj. Mírné aktivátory jsou vhodné pro no-clean tavidla, pracují pouze za zvýšených teplot.

Pojivo je chemikálie, která má pro každou pastu určitou teplotu tavení. Musí mít dobrou tepelnou vodivost. V pojivu jsou při dosažení teploty tavení rozpuštěny oxidy, které byly dříve odstraněny pomocí aktivátoru z pájené plochy. Po odstranění těchto oxidů vytvoří pojivo ochranný film na pájecích ploškách, který je chrání před další oxidací. Proto je velmi důležité, aby pojivo nebylo odpařeno vysokou teplotou v pájecím procesu ještě před samotným procesem přetavení. U pájené spoje by pak nemohla být zaručena dlouhá životnost [29][30].

### 2.1.1 Olovnaté pájecí pasty

Olovnaté pájky byly do roku 2006 nejvyužívanější, následně začaly být regulovány evropskou komisí a dnes se používají pouze v některých povolených odvětvích např. zdravotnictví a vojenství. Například pájecí pasta Sn62Ag2Pb36, která bude dále použita v praktické části. Pasta se skládá ze 62 % cínu, 2 % stříbra a 36 % olova. Pasta má teplotu tavení mezi 179 a 189 °C, tato pájka má nejnižší hodnotu tavení z cín-olovnatých slitin. Při jejím použití dochází k nejmenšímu teplotnímu stresu součástek. Příměs stříbra zde snižuje teplotu tání a zvyšuje cenu pájecí pasty. Jedná se o eutektickou slitinu, to znamená, že slitina dvou nebo více kovů obsahuje takovou kombinaci procentuálního množství jednotlivých kovů, aby se roztavila při co nejnižší teplotě, to eliminuje nedokonalé roztavení pájky [20].

Pájka Sn63Pb37 je dalším velkým zástupcem olovnatých pájek. Je složená ze 63 % z cínu a 37 % olova. Její velká výhoda je nízký pod tání 183 °C, což je velmi žádané, jelikož součástky nemusí být tak teplotně namáhány jako u jiných bezolovnatých past. Tato pasta také disponuje dobrou mechanickou odolností, proto mají pájené spoje dlouhou životnost.[19]

### 2.1.2 Bezolovnaté pájecí pasty

Po roce 2006, kdy evropská legislativa omezila používání olovnatých pájek, nahradily olovnaté pájky bezolovnaté. Například pájecí pasta SnAg3Cu0,5. Tato pasta je složena z cínu, mědi a stříbra. Patří mezi nejčastější náhradu olovnatých pájek. SAC305 (SnAg3Cu05) pájka má o zhruba 30 °C vyšší teplotu tání, což vede k daleko většímu teplotnímu stresu součástek. SAC305 pasta má také vyšší povrchové napětí, což je pro pájený spoj nežádoucí, ale tato nevýhoda může být zlepšena použitím dusíkové atmosféry. SAC pájka má oproti olovnaté matný a celkově hrubší povrch. Častěji také dochází ke tvorbě defektu zvanému voiding, což znamená vytváření prázdných míst/bublinek uvnitř zapájené pájky [17].

Pájecí pasta SN100C je velmi často používaná v průmyslové výrobě. Pájecí pasta se skládá z více jak 99 % cínu, další příměsi tvoří měď 0,7 %, nikl 0,05 % a germanium 0,009 %. Tvorba strusky je stejná nebo nižší než u pájky Sn/Pb a má lepší odolnost vůči tepelné únavě [18].

	Bezolovnaté pasty		Olovnaté pasty	
	SnAg3.0Cu0.5	Sn100C	Sn62Ag2Pb36	Sn63Pb37
Zóna předeřtání	20-150 °C, 1-2 °C/s	30-160 °C 2-4 °C/s	30-150 °C 1-3 °C/s	20-150 °C 1,5-2 °C/s
Zóna vyrovnání	150-180 °C, 60-140 s	160-200 °C 60-90 s	120-170 °C 60-120 s	150-170 °C 60-90 s
Maximální teplota	235-250 °C 1-2 °C/s	235-245 °C	210-230 °C	210-220 °C
Zóna chlazení	1,8-7 °C/s	1-6 °C/s	1-3 °C/s	<4 °C/s
Teplota tavení	217-219 °C	227 °C	179-189 °C	183 °C
Typ tavidla	ROLO	ROL1	ROL1	ROLO

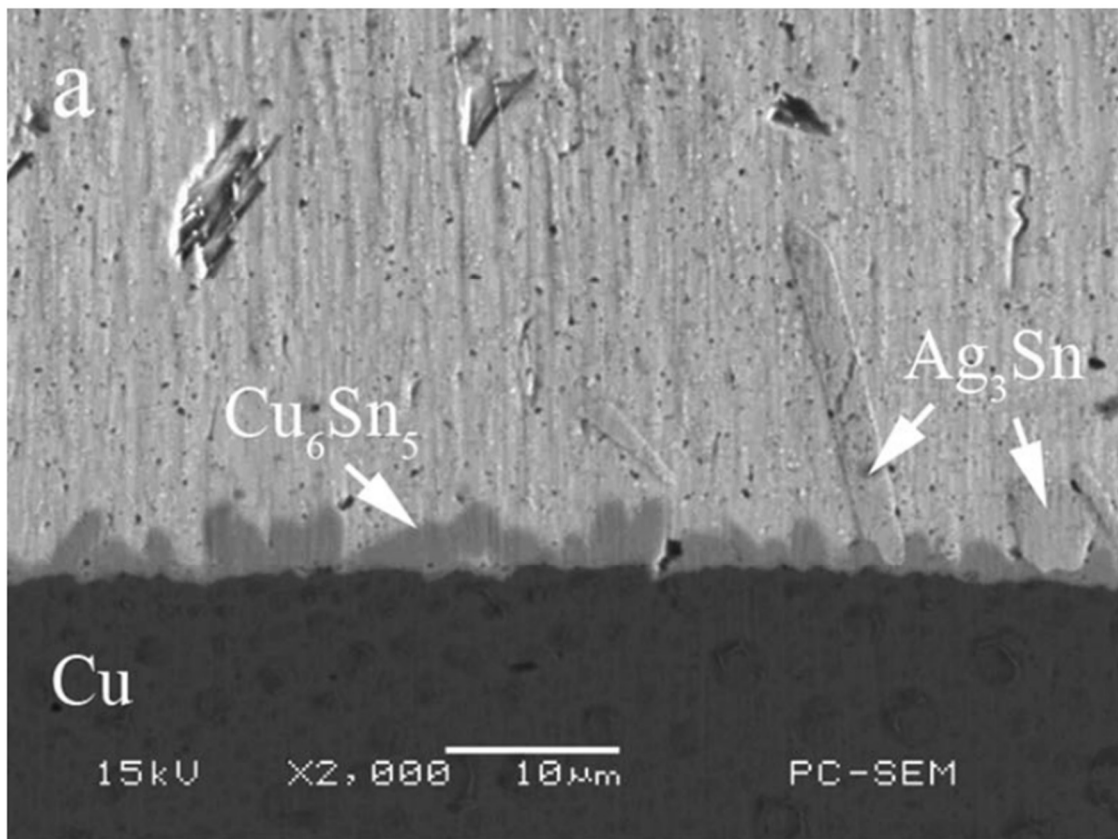
Tabulka 2.1 Teplotní rozdíly jednotlivých pájecích past

### 2.1.3 Příměsové materiály v pájce

- Antimon (Sb): Výrazně zlepšuje smáčivost, zlepšuje pevnost spoje
- Bismut (Bi): Zlepšuje smáčecí charakteristiky, snižuje teplotu tavení
- Měď (Cu): Zlepšuje pevnost spoje
- Nikl (Ni): Prevence odsmáčení
- Stříbro (Ag): Zlepšuje pevnost spoje, snižuje teplotu tavení
- Germanium (Ge): Prevence oxidace [21]

## 2.2 Intermetalická fáze

Intermetalická fáze je homogenní chemická sloučenina tvořená z dvou nebo více kovů. Intermetalické fáze vznikají z důvodu rozdílných struktur krystalické mřížky, která se liší od vedlejšího kovu ve fázovém diagramu. Intermetalická sloučenina vzniká při procesu přetavení, kdy pájecí slitina difunduje do pájeného povrchu. Intermetalická sloučenina je do určité míry žádoucí, z důvodu smáčivosti a metalurgickému propojení. Jakmile je tloušťka intermetalické sloučeniny příliš tlustá, řádově desítky  $\mu\text{m}$ , oslabuje spájený spoj. Spoj se stane křehkým, se zvyšující se tloušťkou intermetalické sloučeniny se zvyšuje elektrický odpor. Velikost intermetalické vrstvy můžeme snížit vhodným teplotním profilem a omezením vystavení DPS teplotnímu stresu [1][2][3].



Obrázek 2.2 Intermetalická sloučenina na rozhraní pasty SAC305 a měděného povrchu substrátu [5]

### 2.2.1 Stárnutí Intermetalické vrstvy

IMC – InterMetallic Compound neboli intermetalická vrstva stárne prakticky od jejího vytvoření, již při pokojové teplotě se pomalu začne zvětšovat IMC. Při zvýšené teplotě postupuje zvětšování této vrstvy rychleji, atomy obdrží více energie a mohou se snadněji pohybovat uvnitř pájeného spoje. IMC je nejslabší místo celého spoje, jelikož vrstva není natolik pružná jako okolní materiál a je také křehčí, proto jsou staré spoje náchylné na otřesy a vibrace. Při stárnutí IMC dochází ke zvyšování elektrického odporu pájeného spoje a to zejména tvorbou voidů[1][2][3].

## 2.3 Smáčivost

Smáčivost plochy je vlastnost vyjadřující schopnost vytvořit na jejím povrchu při styku s roztavenou pájkou souvislou vrstvu pájecího materiálu. Kvalita pájeného spoje závisí na smáčivosti pájeného povrchu.

Roztavená pájka se chová jako kapalina. Mezi jednotlivými molekulami působí relativně velké přitažlivé síly, díky kterým se pájka tvaruje do kulového tvaru, protože koule je těleso, které má nejmenší povrch. Hlavními parametry jsou stupeň smáčivosti



a rychlost smáčení. Stupeň smáčivosti nám definuje, jak daleko se roztavená pájka rozteče, rychlost smáčení definuje rychlost roztečení pájky [1][2][3].

## **2.4 Difúze**

Difúze je klíčový proces při pájení. Difúze vzniká při pájení, jakmile smočíme povrch pájecí plošky roztavenou pájkou, dochází k difúzi atomů pájky do volných míst v krystalické mřížce pájecí plošky a opačně. Díky procesu difúze je umožněno vzájemné spojení dvou kovů bez potřeby tavení obou materiálů, díky dodávané teplotě přecházejí atomy pájky do volných míst v krystalické mřížce druhého kovu. S rostoucí teplotou pájených materiálů vzrůstá i kinetická energie atomů [1][2].

### 3. TEPLOTNÍ PROFIL

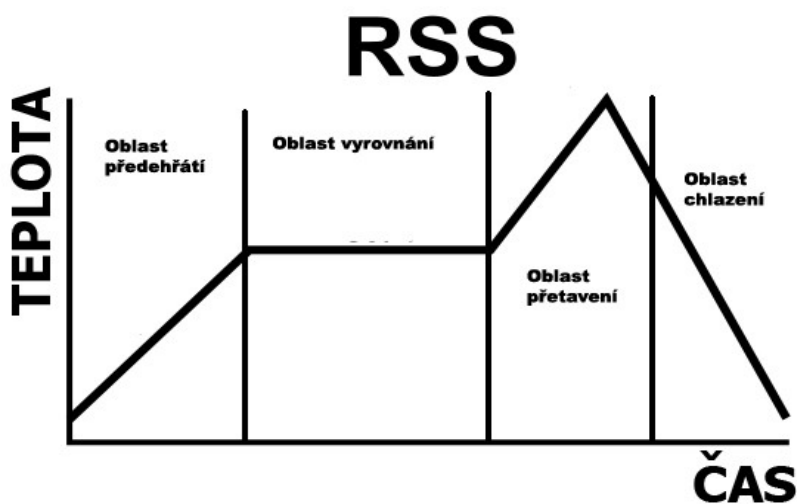
Pro správně zapájenou DPS je nejdůležitější odpovídající teplotní profil. Teplotní profil popisuje průběh teploty pájeného spoje v čase. Teplotní profil se nastavuje podle typu pájecí pasty, základového substrátu a typu komponentů [24].

Teplotní profily se dělí na:

- Podélný teplotní profil
  - Sedlový teplotní profil (RSS – Ramp Soak Spike)
  - Lineární teplotní profil (RTS – Ramp to Spike)
- Příčný teplotní profil

#### 3.1 Sedlový teplotní profil

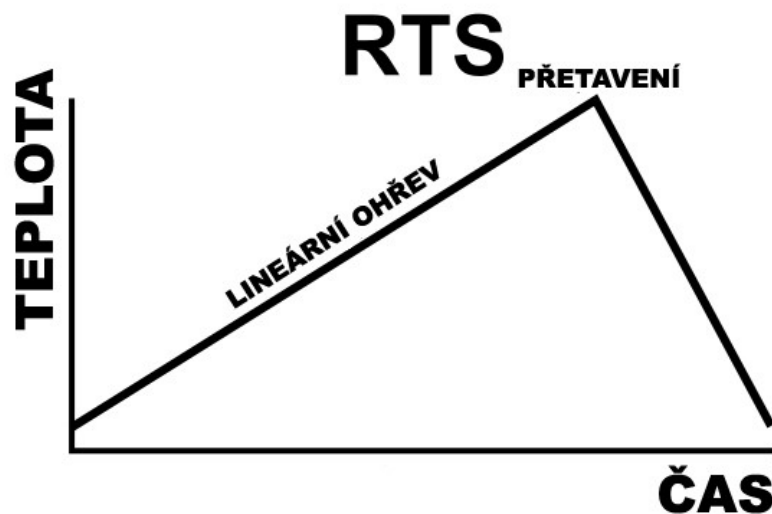
Sedlový teplotní profil se skládá ze čtyř částí, pro každou z nich je definovaná teplota, strmost stoupání a doba trvání. První oblast je oblast předehřevu kde se DPS lineárně ohřívá z pokojové teploty na teplotu okolo 150 °C. Poté následuje oblast vyrovnání, při které je vhodné docílit rovnoměrného ohřátí malých i velkých součástí a aktivaci tavidla. V třetí oblasti nastává strmý nárůst teploty na špičkovou teplotu zhruba 35 °C nad teplotu zkapalnění pájky, potom co se pájka roztaví vytvoří spoj. Poslední oblast je chlazení, ve které se musí DPS ochladit na teplotu okolo 50 °C, kde už nebudou tepelně namáhány součástky [24].



Obrázek 3.1 Sedlový teplotní profil

### 3.2 Lineární teplotní profil

Lineární teplotní profil neboli Ramp to Spike, tento profil je definován lineárně vzrůstající teplotou až na špičkovou hodnotu. Lineární profil neobsahuje oblast vyrovnání, tudíž nedochází k vyrovnání teplotních rozdílů jednotlivých součástek. Díky absenci zóny vyrovnání je profil zjednodušen a celkový proces bude trvat kratší dobu. Také nedochází k odpaření veškerého tavidla před přetavením, to napomáhá k lepšímu smáčení. Tento pájecí profil se nejčastěji používá při opravách DPS, demontáži složitějších pouzder. Lineární teplotní profil není vhodný pro sériovou výrobu DPS [24].



Obrázek 3.2 Lineární teplotní profil

### 3.3 Příčný teplotní profil

Příčný teplotní profil charakterizuje nehomogenitu napříč přetavovacím tunelem pece. Ideální příčný teplotní profil by byl takový, kde by byly shodné všechny měřené teploty napříč DPS. Výsledný profil ovlivňuje kvalita dané přetavovací pece a hustota součástek na DPS.

Při měření příčného teplotního profilu je nutné umístit termočlánky napříč měřenou DPS. Termočlánky musí být umístěny k součástkám se stejnou tepelnou kapacitou, aby nedocházelo ke zkreslování měření. V ideálním případě by měla být na všech termočláncích stejná teplota, to je ale velmi nepravděpodobné, neboť profesionální pece mívají rozdíl teplotu 1-3 °C.

## 3.4 Zóny v teplotním profilu

Teplotní profil je rozdělen do několika zón. Konkrétní doporučené teploty a doby trvání jednotlivých zón jsou uvedeny v datasheetu dané pájecí pasty, každý výrobce má své hodnoty odlišné, závislé na provedených zkouškách a měřeních pro danou pájecí pastu [24].

### 3.4.1 Oblast přehřevu

Deska s plošnými spoji by měla být rovnoměrně vyhřívána, aby nedošlo k přehřátí jednotlivých součástek. Těkavá rozpouštědla v pájecí pastě se začnou během zahřívání odpařovat. Příliš rychlé zvýšení teploty by způsobilo kuličkování pájky. Maximální rychlost by proto neměla překročit 3 °C/s (Obr. 3.3) [24].

### 3.4.2 Oblast vyrovnání

DPS je zahřívána ze 150 °C na 180 °C po dobu 50-120 s. Těkavé látky se zatím odstraní, tavidlo se aktivuje a zredukuje oxidy na pájecích ploškách. Čas a teplota jsou doporučeny dodavatelem pasty v závislosti na typu tavidla [24].

### 3.4.3 Oblast přetavení

Doporučená maximální teplota přetavení např. u slitiny SAC305 musí být větší než 235 °C, ale nedoporučuje se přesáhnout teplotu 250 °C. Doba nad teplotou zkapalnění pájecí pasty se nazývá doba přetavení. Proces by měl být natolik dlouhý, aby kapalná pájka dostatečně smočila pájecí plošky a povrchy součástek a vytvořila se intermetalická fáze. Příliš dlouhá doba přetavením by zapříčinila křehké pájené spoje, poškození DPS nebo součástek [24].

### 3.4.4 Oblast chlazení

Rychlé ochlazení zabraňuje nadměrné tvorbě intermetalických struktur a vytváří jemné zrno ve struktuře pájky. Rychlost chlazení může být vyšší než rychlost ohřívání, ale neměla by překročit 6 °C/s, aby nedošlo k povrchovému pnutí a zbytečnému teplotnímu stresu součástek [24].

## 3.5 Měření teplotního profilu

Pro správné nastavení teplotního profilu je nutné jeho měření. K měření teploty se používají termočlánky. Ty jsou zpravidla vestavěny v samotných pájecích zařízeních, kde měří aktuální teplotu, např. teplotu v jednotlivých zónách přestavovací pece. Pro specifitější měření teploty jednotlivých míst na DPS lze použít profilometr. V podstatě se jedná o zařízení, které disponuje několika termočlánky, které je vhodné rozmístit na kritická místa na DPS. Zpravidla volíme nejmenší, největší a nejdražší součástky nebo

diagonální rozložení. Profilometr musí být navržen na průchod přetavovací pecí při teplotě daného profilu, naměřená data je možné následně zpracovat v počítači [26][27].

### **3.5.1 Termočlánky**

Termočlánek je snímač pro měření teploty, který funguje na principu termoelektrického jevu. Termočlánek je složen ze dvou různých kovů, které jsou spojeny do jednoho bodu. Pokud tento spoj dvou materiálu ohřejeme nebo ochladíme, je na přírodních koncích vodiče napětí, které je možné přepočíst na teplotu. Pro měření teplotních profilů se nejvíce používá termočlánek typu K, který se skládá z NiCr – NiAl (nikl, chrom – nikl, hliník) jeho rozsah se pohybuje od -200 °C až do 1250 °C [25].

## 4. DEFEKTY PO PÁJENÍ PŘETAVENÍM

Defekty vznikají díky nevhodně zvoleným parametrům, např. špatně nastavený teplotní profil, nevhodně zvolená pájecí pasta, špatně provedená úprava povrchu DPS.

- Kuličky pájky (solder balling): může se jednat o příliš vysokou teplotu pájky nebo příliš aktivní tavidlo, vyšší koncentrace oxidů v pájce [12]
- Můstky (bridging): příliš velké množství pájky [10]
- Tombstoning: příliš velké tepelné rozdíly (jedna část je zapájena rychleji a díky povrchovému napětí se zvedne z povrchu DPS), nevhodně rozložené množství pájecí pasty [11].



Obrázek 4.1 Defekt bridging [10]

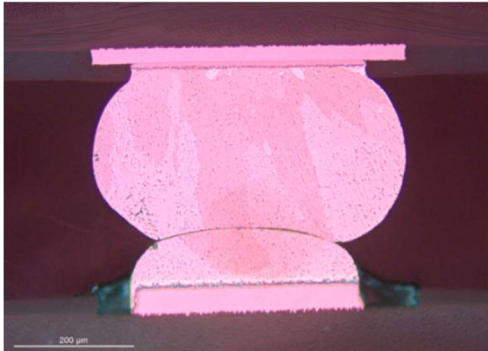


Obrázek 4.2 Defekt solder balling [12]

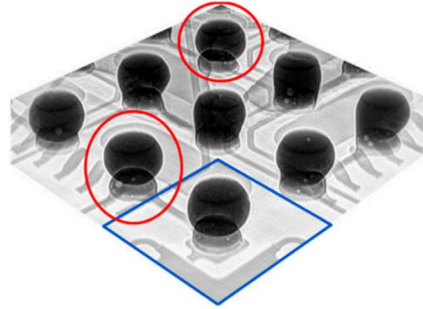


Obrázek 4.3 Defekt tombstoning [11]

- Head on pillow: tento defekt se vyskytuje u větších BGA součástek, BGA součástky jsou na DPS připájeny pomocí pájkových kuliček. Tento defekt vznikne tak, že roztavená pájka smočí pájecí plošku, ale kuličku už ne. Na obrázku pak můžeme vidět dvě přitisklé kuličky. Výskyt těchto defektů se zvedl po zavedení bezolovnaté pájky. Tento defekt je složitější odhalit, používá se proto rentgenová inspekce [13].



Obrázek 4.4 Head on pillow defekt [13]



Obrázek 4.5 Snímek defektu z rentgenu [13]

## 5. POVRCHOVÉ ÚPRAVY

Povrchová úprava měděného povrchu DPS slouží především jako ochrana proti oxidaci a zlepšení pájitelnosti povrchu, díky povrchové úpravě může být deska dlouhodobě uskladněna. Druh povrchové úpravy se volí podle požadavků na danou DPS např.: typ montáže součástek, typ DPS a prostředí, ve kterém se deska bude nacházet. Nejpoužívanější úprava DPS je bezolovnatý HAL. Při vysokých nárocích na rovinnost povrchu se používá Imerzní cín nebo dražší ENIG [1].

### 5.1 Imerzní cín (ImSn)

V chemické lázni se vytvoří tenký nános cínu 0,9-1,1  $\mu\text{m}$ , který ochrání měď proti oxidaci a poskytne dobrou pájitelnost. Doporučené skladování DPS s touto povrchovou úpravou: teplota by neměla přesáhnout 25 °C a 50 % relativní vlhkosti, spotřebovat by se měly do 6 měsíců (čím dříve, tím lepší bude pájitelnost). Mezi výhody se řadí dobrá pájitelnost, bezolovnatý proces, rovinnost povrchu [14].

### 5.2 Imerzní zlato (ENIG)

Jako první jsou vodivé cesty pokoveny niklem a následně se nanese tenká vrstva imerzního zlata. Zlato je ideální prvek pro ochranu povrchu cest. Zlato netvoří oxidy, což velmi ulehčuje skladování. Další výhodou je rovinnost povrchu díky velmi tenké vrstvě. Nevýhodou je difúze zlata do povrchu spoje a vyšší cena [14].

### 5.3 Organická konzervační látka (OSP)

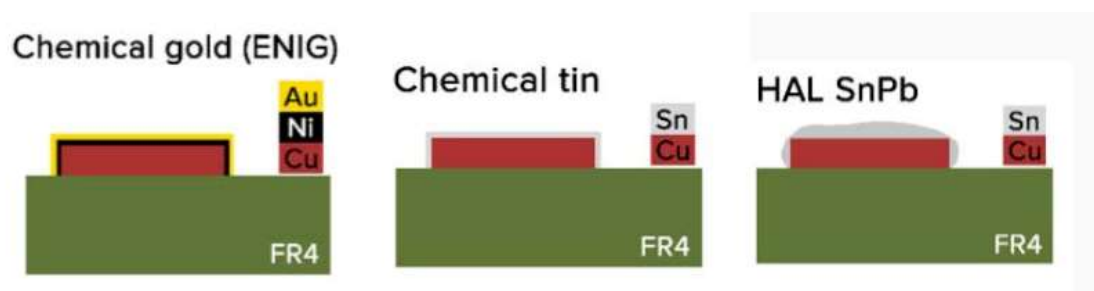
Jedná se o nanesení organických inhibitorů v podobě tenké ochranné vrstvy, přímo na měď substrátu většinou ihned po tisku nepájitivé vrstvy. Výška vrstvy se pohybuje okolo 0,5  $\mu\text{m}$ . Slouží k ochraně DPS před oxidací. Díky tenké vrstvě dosahuje DPS poměrně dobré rovinnosti. Tato metoda je poměrně levná, často se používá pro zakonzervování jiných povrchových úprav, které jsou náchylné na oxidaci. Ochrana pomocí OSP je nejvíce používaná u jednostranných DPS. Hlavní nevýhodou je, že po kontaktu s tavídem se rozpustí [15].

### 5.4 HAL (Hot Air Levelling)

DPS je ponořena do roztavené pájky, přebytečná pájka je od fouknuta pomocí horkovzdušných nožů. Výsledná tloušťka závisí na povrchovém napětí pájky, pohybuje se mezi 2-40  $\mu\text{m}$ . Povrchová úprava chrání Cu před oxidací. Velkou nevýhodou je špatná rovinnost povrchu a velký tepelný šok. Mezi výhody patří dobrá pájitelnost, dlouhá doba skladovatelnosti a možnost vícenásobného teplotního cyklu. Ve většině případů se



používají bezolovnaté pájky, které se skládají ze slitin cín + měď, cín + stříbro + měď [14].



Obrázek 5.1 Struktura povrchových úprav, zprava imerzní zlato, imerzní cín a olovnatý HAL [14]

## 6. PŘETAVENÍ PÁJECÍ PASTY

Pro přetavení pájecí pasty je nutno dodat vhodné množství tepla. Teplota se musí dostat nad teplotu tání pájecí pasty, ale nesmí být příliš vysoká, aby nedošlo k destrukci součástek. Existuje několik možností ohřevu pájecí pasty, vedením (kondukce), prouděním (konvekce), zářením (radiace).

### 6.1 Pájení infračerveným zářením

Pro pájení infračerveným zářením (radiací) se používají pece vybaveny IR zářiči, které jsou rozmístěny nad i pod dopravníkem. Tato metoda je velice závislá na rozmístění součástek. Pokud je pájený spoj zakryt součástkou IR záření nejdříve zahřeje danou součástku, a poté až pájený spoj. Dále také záleží na barvě součástek, tmavé součástky přijmou více tepla než pájený spoj a hrozí jejich deformace, nebo zničení. Pro zvýšení homogenního rozložení tepla se používají ventilátory. Teplotní profil se dá nastavovat pomocí regulace výkonu jednotlivých IR zářičů a rychlostí dopravního pásu [22].

- Výhody: Cena
- Nevýhody: Nehomogenní ohřev DPS  
Teplotní stres součástek  
Nevhodné pro pájení BGA pouzder



Obrázek 6.1 IR přetavovací pec 4,5 kW [23]

## 6.2 Pájení v parách

Pájení v parách neboli také kondenzační pájení, při procesu dochází k zahřátí kapaliny na bod varu, následně dochází k vypařování páry, která zkondenzuje na chladné DPS, které předá teplo. Zahřátá pára neobsahuje kyslík, takže nedochází k oxidaci. Teplota přetavení se nastavuje použitým typem kapaliny pro odpaření, DPS nemůže překročit teplotu páry, proto nemůže dojít k přehřátí. Tato metoda je vhodná pro hustě osazené DPS, jelikož dochází k homogennímu předání tepla i na špatně dostupná místa, je tato metoda vhodná i pro BGA součástky [1][6][7][8].

- **Výhody:** Homogenní pracovní teplota  
Žádná oxidace (páry vytlačí lehké plyny, tím vznikne ochranná atmosféra)  
Vysoká účinnost (tato metoda umožňuje naskládat desky na sebe)  
Vysoká kvalita  
Nízký teplotní stres součástek
- **Nevýhody:** Vysoká cena procesu



Obrázek 6.2 kondenzační pec CX 600/800 [8]

## 6.3 Konvekční pájení

Pro konvekční pájení se používají konvekční (reflow) pece. Konvekční pece se dělí na pece s přirozenou konvekcí a pece s nucenou konvekcí. Pro přenos tepla se používá vzduch nebo dusík, k usměrnění tepelného média slouží trysky nebo ventilátory. Dusík se pro tuto metodu používá, jelikož významně snižuje oxidaci pájených spojů během procesu. Pece se dělí na dávkové (pro malovýrobu, výzkum) a na velké průběžné (inline) pece, umístěné na sériových linkách. Inline pece jsou několikanásobně větší a dražší než pece dávkové. Inline pece umožňují plynulý chod sériové výroby. Skrz celou pec vede dopravník, na kterém jsou rozmístěny DPS a postupně se posouvají jednotlivými

teplotními zónami v peci, proto je velmi důležitá optimalizace teplotního profilu [1][6] [7][9].

- Výhody: Vhodné pro pájení DPS s vysokou hustotou osazení součástek, možnost zařazení pece do sériové linky
- Nevýhody: energeticky náročná, cena



Obrázek 6.3 Inline pec Ersa HOTFLOW 4/14 [6]

## 6.4 Profilometr SuperM.O.L.E. Gold 2

Měření teplotních profilů bude probíhat pomocí teplotního profilometru SuperM.O.L.E. Gold 2. Tento profilometr disponuje až šesti termočlánky typu K, chyba měření je  $\pm 1$  °C, rozlišení teploty je 0,056 °C a měřicí rozsah je od -200 °C do 1271 °C. Profilometr disponuje USB pro připojení k PC a vyhodnocení naměřených dat. Jelikož profilometr pracuje v rozmezí teplot od -40 °C do 85 °C, je nutno ho ochránit tepelnou bariérou E44-0944-80, která ochrání profilometr až na 10 min v teplotě 300 °C, tato bariéra je navíc chráněna krytem, který je vyroben z izolační tkaniny [16].



Obrázek 6.4 Profilometr SuperM.O.L.E. Gold 2 [28]

## 7. VYTVOŘENÍ KONTROLNÍCH PARAMETRŮ

Po konzultaci s technologem byly vytvořeny tři různé nastavení teplotních profilů pro každou přetavovací pec, dva pro bezolovnaté pájení a jeden pro olovnaté pájení. Proto došlo ke sloučení hodnot intervalů jednotlivých pájecích past, byly vytvořeny dva soubory doporučených hodnot, první pro bezolovnaté pájky a druhý pro olovnaté pájky. Pro vytvoření nových parametrů bylo nutné sloučit intervaly dvou pájecích past, například SAC305 a SN100C.

První kontrolovaná hodnota je interval teplot přehřátí a maximální rychlost stoupaní teploty. Zde byl zvolen interval teploty 30-150 °C, aby mohlo tavidlo déle pracovat v zóně vyrovnání. Pro maximální rychlost stoupaní teploty byla doplněna spodní hranice intervalu na 1-2 °C/s, z důvodu, aby bylo vyhověno oběma technickým požadavkům pájecí pasty. Další kontrolovaný parametr byl teplotní interval v zóně vyrovnání, kde bylo nutné použít hodnoty intervalu pro pastu SN100C, jelikož by při vyšší teplotě, kterou má doporučená pasta SAC305 mohlo dojít k odpaření tavidla dříve, než by byl pájený spoj dokončen. Dále byl vytvořen interval pro maximální doporučenou teplotu, kde byl zvolen spodní interval od pasty Sn100C (235 °C), protože se spodním intervalem od pasty SAC305 (230 °C) by nebylo zaručeno kvalitní zapájení pájeného spoje. Horní hranice byla zvolena od pájecí pasty SAC305 (250 °C), jelikož maximální teplota pájecí pasty Sn100C (255 °C) je pro pájecí pastu SAC305 příliš vysoká a mohlo by dojít ke přehnané tvorbě IMC. Pro zónu chlazení byl kvůli pájecí pastě Sn100C zvolen interval od 1-4 °C/s, nedejde tak ke zbytečnému teplotnímu namáhání DPS. Teplota tavení u pájecí pasty SAC305 je nižší (220 °C) než u pájecí pasty Sn100C (227 °C), proto se použije hodnota vyšší, aby bylo zajištěno kvalitní zapájení. Stejným způsobem byla vytvořena tabulka doporučených hodnot pro olovnaté pájecí pasty.

	Bezolovnaté pasty		Olovnaté pasty	
	SnAg3.0Cu0.5	Sn100C	Sn62Ag2Pb36	Sn63Pb37
Zóna přehřátí	30-150 °C, 1-2 °C/s	30-160 °C max 2 °C/s	30-140 °C 1-2,5 °C/s	20-150 °C max 2,5 °C/s
Zóna vyrovnání	155-185 °C, 30-120 s	150-175 °C 30-90 s	140-160 °C 30-120 s	140-160 °C 30-120 s
Maximální teplota	230-250 °C 1-2 °C/s	235-255 °C 45-75 s	205-225 °C	205-225 °C
Zóna chlazení	1-6 °C/s	max 4 °C/s	1-3 °C/s	1-3 °C/s
Teplota tavení	220 °C 30-100 s	227 °C 30-90 s	183 °C	183 °C 60-90 s
Typ tavidla	ROLO	ROLO	ROL1	ROLO

Tabulka 7.1 Doporučené hodnoty pro jednotlivé pájecí pasty

	Doporučené hodnoty pro bezolovnaté pasty	Doporučené hodnoty pro olovnaté pasty
Zóna přehřátí	30-150 °C, 1-2 °C/s	30-140 °C 1-2,5 °C/s
Zóna vyrovnání	155-175 °C 30-90 s	140-160 °C 30-120 s
Maximální teplota [°C]	235-250	205-225
Zóna chlazení [°C/s]	1-4	1-3
Teplota tavení	227 °C 30-90 s	183 °C 60-90 s
Typ tavidla	ROLO	ROL1

Tabulka 7.2 Nastavené kontrolní parametry pro bezolovnaté a olovnaté pájecí pasty

## 8. MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH PROFILŮ

Pro testovací měření byly vytvořeny upravené teplotní profily vycházející z doporučených teplotních profilů pro danou přetavovací pec a pájecí pastu, profily byly upraveny tak, aby byla demonstrována odchylka od požadovaného pájecího profilu. Naměřené teplotní profily jsou plánované pro použití na zaškolení obsluhy. Měření teplotních profilů proběhlo na třech přetavovacích pecích, kterými firma disponuje, ERSA hotflow 2/12, 3/14 a 4/14. Jednotlivé důležité parametry pecí jsou vypsány v tabulce 8.1. Měření bylo provedeno pro tři přednastavené pájecí profily. Parametry jednotlivých profilů jsou pro každou pec rozdílné, protože mají rozdílný počet jednotlivých zón je tedy nastavení pro každou pec individuální.

TP1 – Teplotní profil určený pro bezolovnatou pájecí pastu a pro DPS s nízkou zástavbovou hustotou.

TP2 – Teplotní profil určený pro bezolovnatou pájecí pastu a pro DPS s velkou zástavbovou hustotou.

TP3 – Teplotní profil určený pro olovnatou pájecí pastu.

Chladicí zóny	Ersa hotflow 4/14	Ersa Hotflow 3/14	Ersa Hotflow 2/12
Délka pece [m]	4,4	3,79	2,45
Vytápěcí zóny [m]	2,665	2,65	1,65
Chladicí zóny [m]	1,735	1,14	0,8
Šířka dopravníku [mm]	45-560	45-580	50-500
Max výška DPS [mm]	+32/-40	+25/-37	+35/-20
Rychlost dopravníku [cm/min]	20-200	20-200	20-200
Zóna předehřevu	5	5	4
Zóna přetavení	2	2	2
Zóna chlazení	3	3	2 (pouze ze shora)

Tabulka 8.1 Důležitých parametrů přetavovacích pecí



ERSA 2/12	1	2	3	4	5	6	7	8	rychlost dopravníku	horní vent.	dolní vent.
TP3	160	190	205	212	280	255	40	35	45 cm/min	50 %	55 %
Pb	160	190	200	200	275	255					
TP1	160	190	200	200	280	260	40	35	40 cm/min	50 %	55 %
PbFree	160	190	200	200	280	260					
TP2	160	190	210	205	285	260	40	35	40 cm/min	70 %	70 %
PbFree	160	190	200	200	280	260					

Tabulka 8.2 Nastavené hodnoty pro jednotlivé teplotní profily na přetavovací peci Ersa 2/12

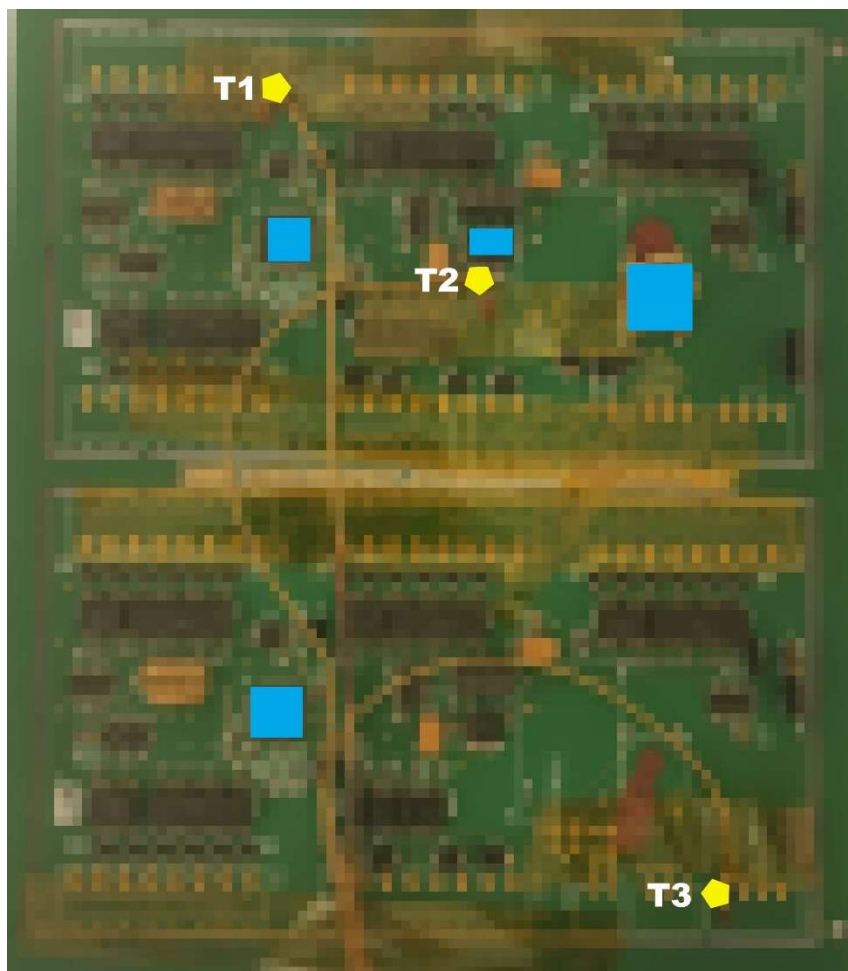
ERSA 3/14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	rychlost dopravníku	horní vent. (1)	horní vent. (2)	dolní vent. (1)
TP3	160	180	190	200	200	280	250	80	30	70 cm/min	40 %	40 %	40 %
Pb	160	180	190	200	200	275	250						
TP1	165	180	205	195	195	292	255	100	35	65 cm/min	45 %	45 %	45 %
PbFree	165	180	205	195	195	292	255						
TP2	165	180	210	200	200	297	260	100	35	65 cm/min	45 %	45 %	45 %
PbFree	165	180	200	190	198	287	250						

Tabulka 8.3 Nastavené hodnoty pro jednotlivé teplotní profily na přetavovací peci Ersa 3/14

ERSA 4/14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	rychlost dopravníku	horní vent.(1)	horní vent.(2)	dolní vent. (1)	dolní vent. (2)
TP3	140	165	170	190	219	245	260	100	35	82 cm/min	50 %	75 %	50 %	75 %
Pb	140	165	170	190	219	245	260							
TP1	165	180	205	195	195	292	255	100	35	70 cm/min	50 %	75 %	50 %	75 %
PbFree02	165	180	205	195	195	292	255							
TP2	165	180	205	195	195	292	255	100	35	70 cm/min	50 %	75 %	50 %	75 %
PbFree08	165	180	205	195	195	292	255							

Tabulka 8.4 Nastavené hodnoty pro jednotlivé teplotní profily na přetavovací peci Ersa 4/14

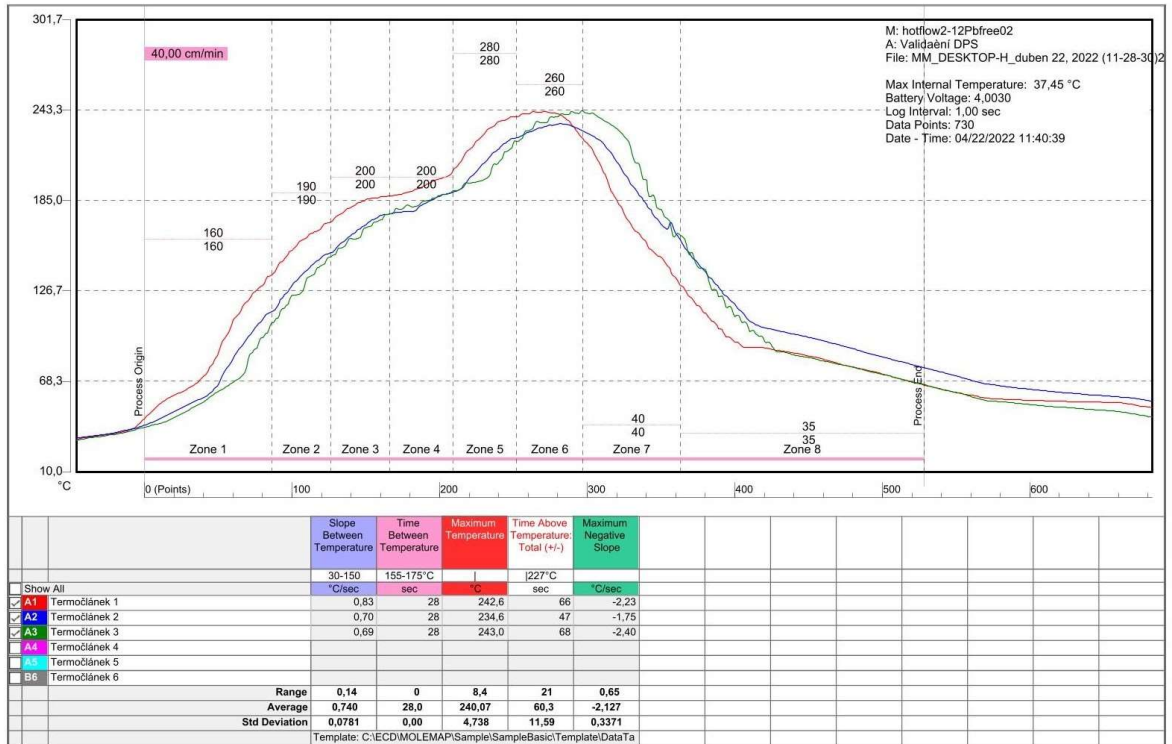
Jednotlivé čísla 1-8 v tabulce 8.1 představují zóny přetavovací pece, tedy Ersa 2/12 disponuje osmi teplotními zónami, čtyři oranžové zóny reprezentují zóny předehřevu, červené představují zóny přetavení a modré zóny chladicí. Tabulka také obsahuje výkony jednotlivých ventilátorů uvnitř pece, které jsou vyjádřeny v procentech.



Obrázek 8.1 Validační DPS používána pro měření teplotních profilů

Validační DPS používaná pro měření teplotních profilů musí být díky autorskému právu cenzurována. Modré obdélníky na DPS znázorňují součástky s velkou tepelnou kapacitou, žluté pětiúhelníky znázorňují umístění termočlánků. Termočlánky byly na DPS připevněny pomocí vysokoteplotní olovnaté pájky Sn5Pb93,5Ag1,5. Přívodní vodiče k termočlánkům jsou k DPS připevněny pomocí kaptonové pásky, sníží se tak riziko zachycení vodičů uprostřed pece.

## 8.1 Teplotní profil TP1 měřený na přetavovací peci Ersas 2/12



Obrázek 8.2 Teplotní profil TP1 měřený na peci Ersas 2/12

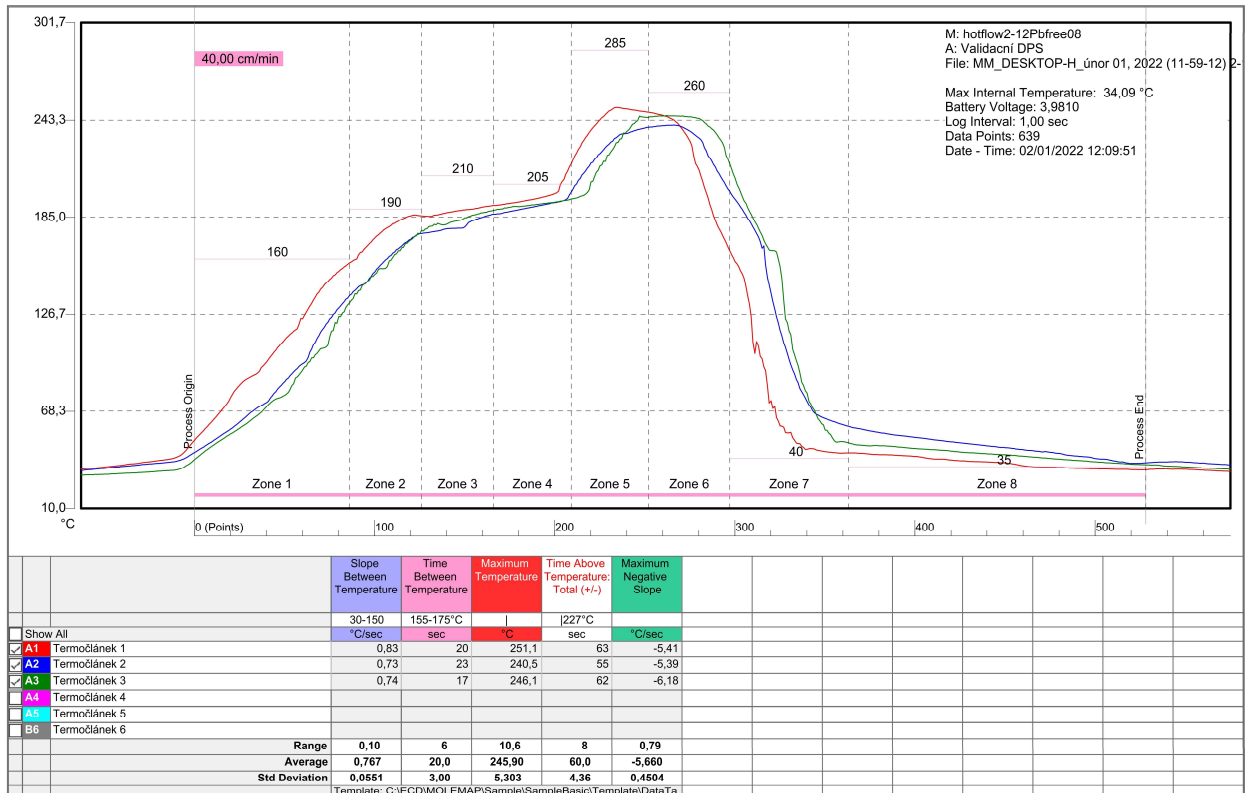
Na obrázku 9.2 je vidět samotný teplotní profil změřený pomocí profilometru Super M.O.L.E. Gold 2 a zpracovaný v programu MOLE MAP3. Teplotní profil je rozdělen do několika zón, které znázorňují reálné zóny v peci a jejich nastavené teploty. Obrázek 9.2 obsahuje tabulku kde jsou zvolené naměřené hodnoty. Z mnoha různých měření bylo vybráno pět nejdůležitějších, které nejvíce ovlivňují kvalitu pájeného spoje. V prvním sloupci je kontrolována rychlost předehřevu DPS, kde jsem podle tabulky 7.2 zvolil kontrovaný interval 30-150 °C. Ve druhém sloupci je kontrolován parametr trvání délky zóny vyrovnání, kde je kontrolován interval mezi teplotou 155-175 °C. Ve třetím sloupci je kontrolována maximální teplota v oblasti přetavení. Ve čtvrtém sloupci je kontrolována doba trvání samotného procesu přetavení, kde byla zvolena teplota 227 °C jako teplota tavení pájecí pasty. V posledním sloupci se kontroluje maximální rychlost chlazení, která se následně porovná s doporučenou hodnotou v tabulce 7.2.

Teplotní profil změřený pomocí T1 předbíhá teplotní profily měřené pomocí T2 a T3, protože termočlánek T1 vstupuje do přetavovací pece jako první. Rozdíl tohoto 5 cm náskoku se projeví rozdílem teplot 5-10 °C. Teplotní profil měřený pomocí T2 a T3 už tohoto rozdílu nedosahují, protože T2 je u součástky s vysokou tepelnou kapacitou tedy je vykompenzován 5 cm náskok oproti T3.

Jako první teplotní profil byl měřen na peci Erska 2/12 s nastavením TP1, který je určen pro bezolovnaté pájení DPS s nízkou zástavbovou hustotou osazení. Naměřené hodnoty budou porovnány s doporučenými viz. tabulky č. 7.2 a případně bude navržena úprava těchto parametrů, které přímo ovlivňují danou chybu. Jako první parametr byla kontrolována rychlost ohřevu DPS v oblasti přehřevu, doporučený interval se pohybuje mezi 1-2 °C/s. Naměřené hodnoty jsou nižší než nejnižší doporučená hodnota, proto by bylo vhodné zvýšit teplotu v zóně č. 1 alespoň o 10-15 °C. Další kontrolovaný parametr je interval času trvání oblasti vyrovnání, doporučená doba je mezi 30 až 90 s. Naměřené hodnoty jsou těsně pod dolní doporučenou hranicí, proto by bylo vhodné snížit teplotu v zóně č. 2 alespoň o 10 °C. Tavidlo by tak mělo dostatek času na očištění pájecích ploch. Další kontrolovaný parametr je maximální teplota v oblasti přetavení, kde doporučená hodnota je v intervalu 235-250 °C. Naměřené hodnoty pomocí termočlánku T1 a T3 splňují doporučený interval, ale teplota naměřená pomocí termočlánku T2 je příliš nízká a tento interval nesplňuje. Proto by bylo vhodné zvýšit teplotu v zóně č. 5 o 5 °C. Další kontrolovaný parametr je doba trvání přetavení pájecí pasty, pro kterou je doporučen interval mezi 30-90 s. Naměřené hodnoty se pohybují ideálně okolo středu tohoto intervalu. Poslední kontrolovaná hodnota je maximální rychlost chlazení DPS, doporučená hodnota se pohybuje v intervalu 1-4 °C/s. Naměřené hodnoty tento interval splňují, pohybují se okolo 2 °C/s.

Celkově tedy z měření vyplývá, že je nutné zvýšit teplotu v zóně č. 1 alespoň o 10-15 °C, snížit teplotu v zóně č. 2 alespoň o 10 °C a jako poslední zvýšit teplotu v zóně č. 5 o 5 °C. Po těchto nutných úpravách nastavení jednotlivých zón pece by měl být teplotní profil ideální pro danou pájecí pastu a měřenou DPS.

## 8.2 Teplotní profil TP2 měřený na přetavovací peci Ersas 2/12



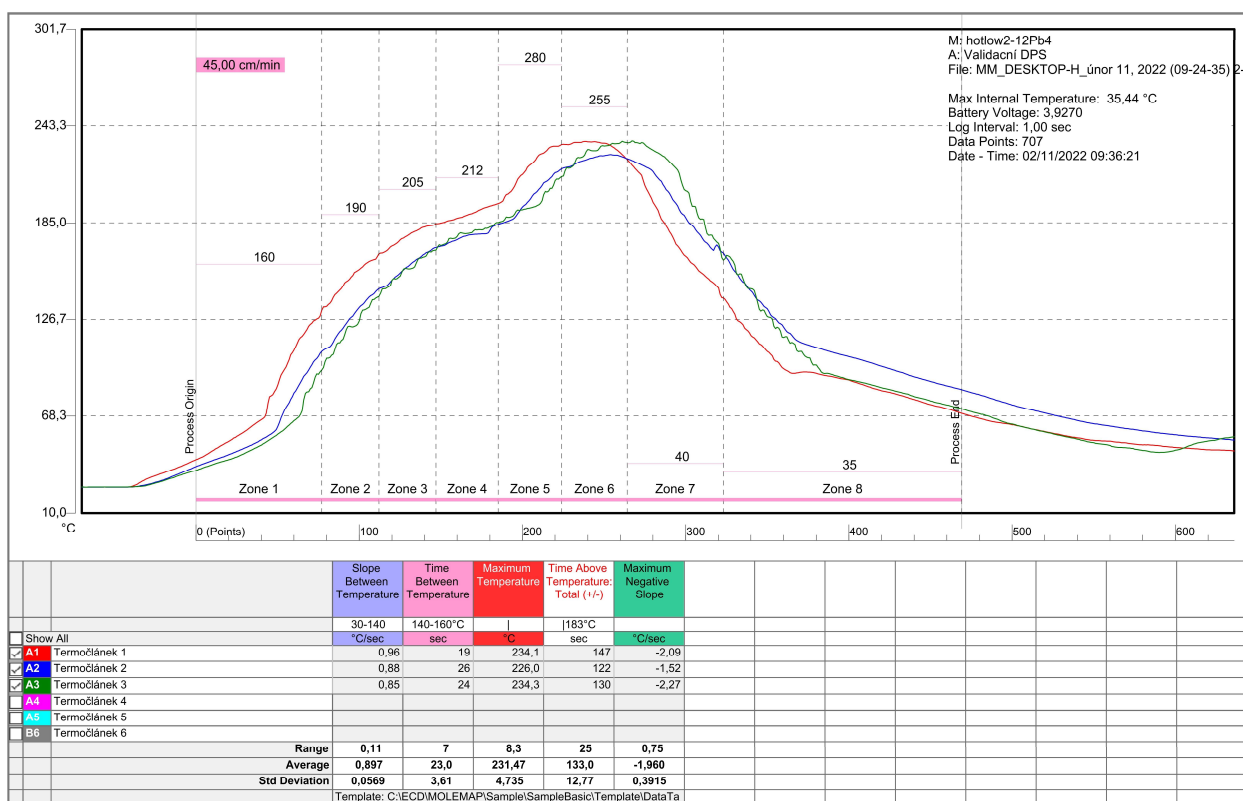
Obrázek 8.3 Teplotní profil TP2 měřený na peci Ersas 2/12

Další měřený teplotní profil je opět pro bezolovnaté pájení (TP2). Je to profil určený pro DPS s velkou zástavbovou hustotou osazení, nastavení pece pro tento profil má ve 3. 4. a 5. zóně nepatrně vyšší teplotu. Nejpodstatnější je ovšem zvýšení rychlosti ventilátorů o 20 %, ventilátory zlepšují konvekci ve všech zónách pece. První kontrolovaný parametr je rychlost stoupání teploty v oblasti předehřevu. Doporučená hodnota stoupání teploty výrobcem pasty je 1-2 °C/s, rychlost stoupání je v tomto případě nižší než nejnižší doporučená, a to přibližně o 25 %. Nižší teplota nijak neovlivní výslednou kvalitu pájeného spoje, dokonce může být pro DPS přínosem, jelikož součástky nebudou vystaveny takovému tepelnému šoku. Jediná nevýhoda spočívá ve zpomalení celého pájecího procesu. U velkých sériových výrob může zpomalení jedné desky o 10 s znamenat zpoždění 27 h u série 10 000 ks DPS. Další kontrolovaný parametr je čas trvání zóny vyrovnání, který je ve vytvořené tabulce 7.2 doporučen na 30-90 s. Naměřená hodnota je přibližně o 30 % kratší než dolní hranice doporučené teploty, proto by bylo vhodné snížit teplotu v zóně 2, 3 a 4 o přibližně 10-15 °C. Ovšem musí být bráno v potaz, že teplotní profil je určený pro hustě osazenou DPS, kde by byla pravděpodobně teplota v oblasti vyrovnání nižší než naměřená. Další byla změřena maximální teplota, která by podle datasheetu měla nabývat hodnot mezi 235 až 250 °C, naměřená hodnota prvního termočláneku přesáhla maximální doporučenou hodnotu o 1,1 °C, proto je nutné snížit

teplotu v zóně č. 5 alespoň o 2-3 °C. Dále byla změřena doba trvání přetavení, doporučená hodnota se pohybuje od 30 až do 90 s, zde se naměřené hodnoty pohybují okolo středu tohoto intervalu. Jako poslední měřenou hodnotou byla maximální rychlost chlazení, která bylo překročena až o 2 °C. Takto rychlé ochlazení by mohlo poškodit nově vzniklý pájený spoj a znehodnotit jeho životnost, proto by bylo vhodné zvýšit teplotu v chladicích zónách alespoň o 10 °C.

Z měření tedy vyplývá, že je velmi složité, správně vyhodnotit teplotní profil, který je určen pro DPS s hustým osazením a je měřen pomocí DPS s průměrnou hustotou osazení. Hodnoty, které mohou být pro DPS s malou hustotou osazení nevhodné nebo i destruktivní, mohou být pro DPS s velkou hustotou osazení naprosto v pořádku a vyhovující. Je tedy pro povoláního technologa velmi složité odhadnout správné nastavení, když neměří teplotní profil přímo na konkrétní DPS.

### 8.3 Teplotní profil TP3 měřený na přetavovací peci Ersas 2/12



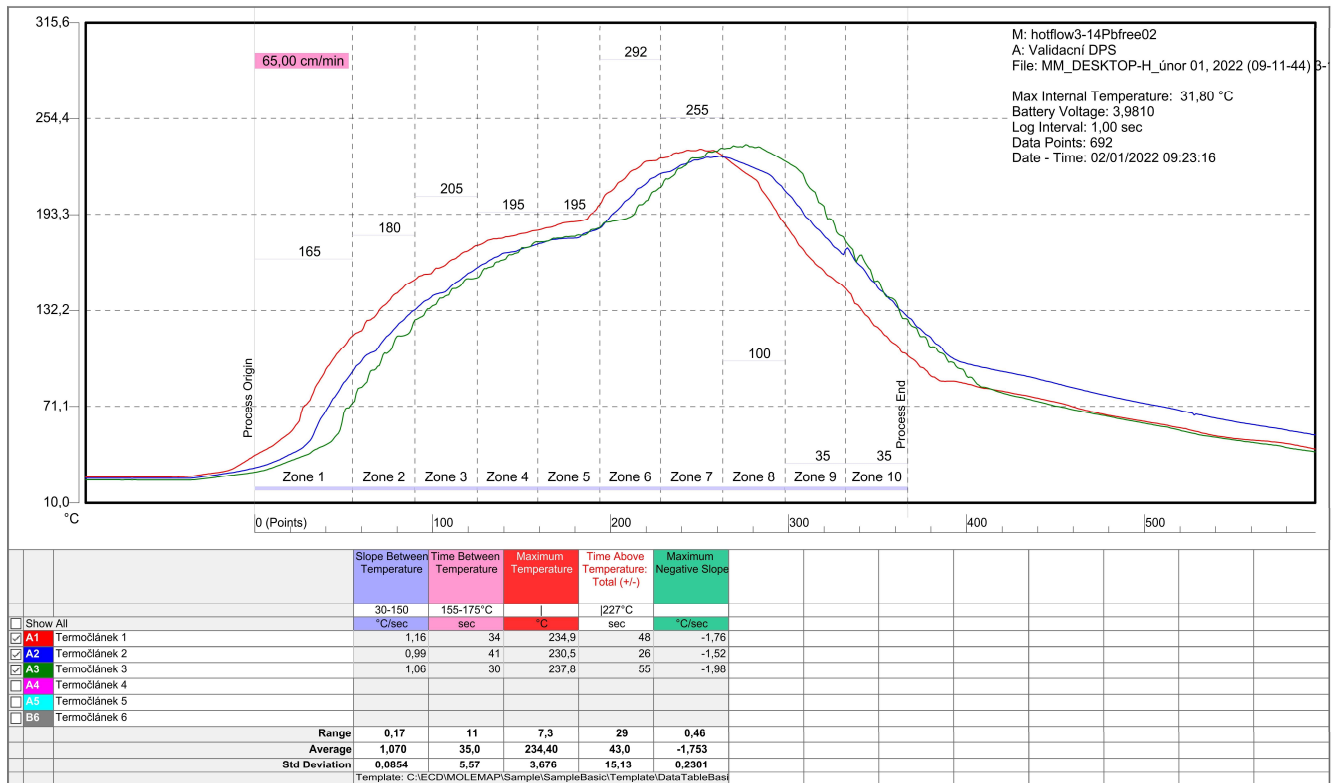
Obrázek 8.4 Teplotní profil TP3 měřený na peci Ersas 2/12

Poslední měřený teplotní profil na přetavovací peci Ersas 2/12, byl teplotní profil TP3 vhodný pro olovnaté pájení. První kontrolovaný parametr byla rychlost stoupaní teploty v zóně předehřevu, doporučená hodnota z tabulky č. 7.2 je 1-2,5 °C/s. Naměřené hodnoty jsou těsně pod nejnižší doporučenou hodnotou intervalu. Bylo by proto vhodné urychlit

dobu přehřevu DPS zvýšením teploty v zóně č. 1 o 10-15 °C. Další kontrolovaný parametr je doba trvání oblasti vyrovnání, doporučený interval pro tuto oblast je 30-120 s. Naměřené hodnoty tento doporučený interval nesplňují, je proto nutné snížit teplotu v zóně č. 2 minimálně o 20 °C. Prodlouží se tak doba oblasti vyrovnání a tavidlo bude mít dostatek času na očistění pájecích ploch. Následně byla zkontrolována maximální teplota v oblasti přetavení, která je doporučena intervalem na 205-225 °C. Naměřené hodnoty přesáhly doporučené na všech termočláncích až o 10 °C. Je proto nutné snížit teplotu v zóně č. 5 a č. 6 minimálně o 10 °C, bude tak zajištěno kvalitní zapájení a nebude přesáhnutá maximální doporučená teplota. Dále byl kontrolován celkový čas trvání přetavení pájecí pasty, kde je hodnota doporučena intervalem 60-90 s. Naměřené hodnoty přesahují doporučený interval až téměř o 60 s. Tento čas bude kladně ovlivněn předchozí změnou (snížení teploty v oblasti přetavení). Dále by se tento čas dal snížit pomocí upravení teploty v zóně č. 3 a č. 4, v zóně č. 3 by se teplota snížila alespoň o 10 °C a teplota v zóně č. 4 by se zvýšila o 10 °C. DPS by tedy dosáhla teploty 183 °C až v zóně č. 4, kde by teplota stoupala rychleji, celkový čas nad teplotou tavení by se tak snížil do doporučených mezí. Poslední kontrolovaný parametr je maximální rychlost chlazení DPS. Doporučený interval rychlosti chlazení je 1-3 °C/s. Naměřené hodnoty tomuto intervalu vyhovují.

Z měření vyplývá, že by bylo vhodné zvýšit teplotu v oblasti přehřevu, a to o 10-15 °C. Dále je nutné snížit teplotu v zóně č. 2 minimálně o 20 °C, aby byla prodloužena oblast vyrovnání. Následně je nutné snížit teplotu v zónách č. 5 a č. 6 alespoň o 10 °C, aby byla dodržena maximální doporučená teplota. Pro dodržení celkového času přetavení pájecí pasty musí být snížena teplota v zóně č. 3 o 10 °C a zvýšena teplota v zóně č. 4 o 10 °C, jinak by mohlo dojít k nadměrné tvorbě IMC.

## 8.4 Teplotní profil TP1 měřený na přetavovací peci Erska 3/14



Obrázek 8.5 Teplotní profil TP1 měřený na peci Erska 3/14

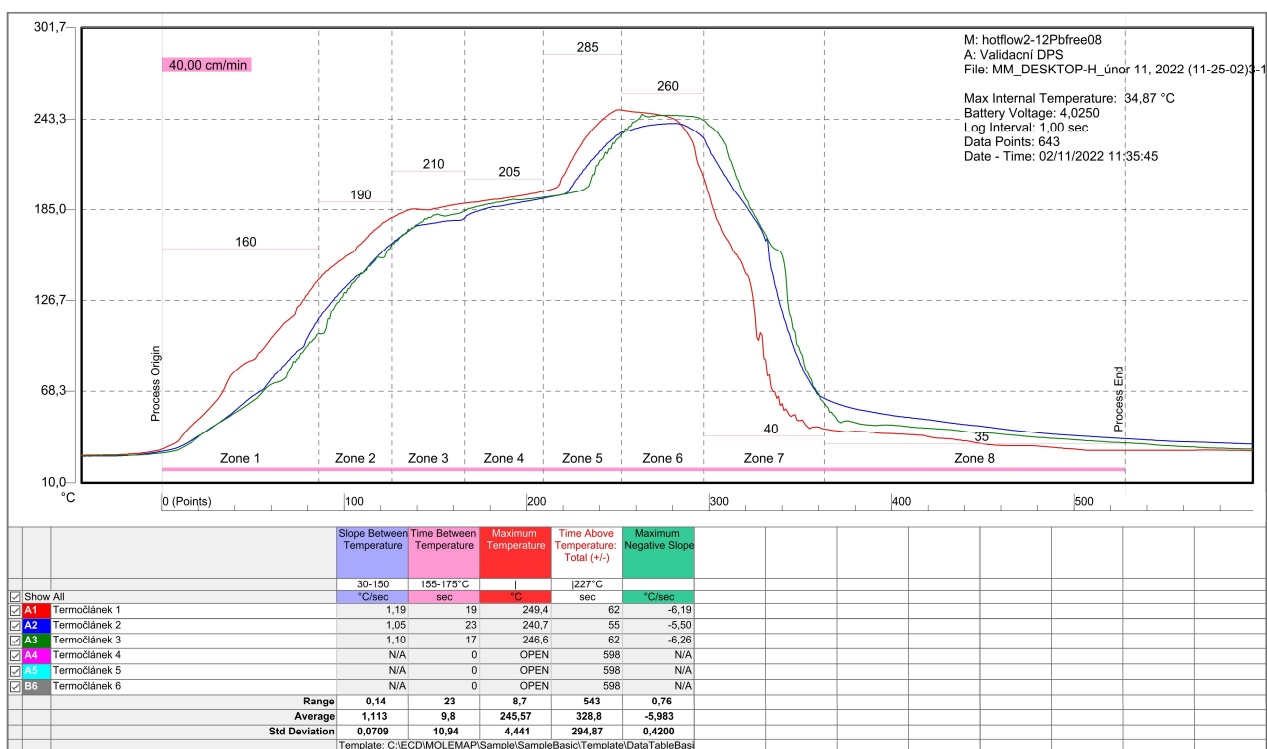
Jedno z dalších měření probíhalo na přetavovací peci Erska 3/14. Tato pec je nástupcem pece Erska 2/12, kontrolovaný bude teplotní profil TP1. První kontrolovaný parametr je rychlost stoupání teploty v předehřívací fázi, doporučený rozsah rychlosti stoupání dle vytvořené tabulky pro bezolovnatou pájecí pastu je 1-2 °C/s. Doporučenou hodnotu teplotní profil splňuje, i když se pohybuje okolo minimální hodnoty rozsahu. Jako další kontrolovaný parametr byla doba trvání oblasti vyrovnání, doporučený rozsah doby byl pro bezolovnaté pájecí pasty vytvořen od 30 s do 90 s. Teplotní profil tento interval splňuje, ale pohybuje se na jeho dolní hranici. Následně byla zkontrolována nejvyšší naměřená teplota v oblasti přetavení, pro kterou je doporučen interval mezi 235-250 °C. Zde byly naměřeny hodnoty u T1 a T2 nižší než nejnížší doporučená hodnota. Pasta Sn100C by tedy v těchto místech nebyla kvalitně zapájena, proto by bylo vhodné zvýšit teplotu v přetavovací zóně č. 6 a č. 7 alespoň o 5 °C. Bylo by tak zaručeno kvalitní zapájení a DPS by nebyla příliš tepelně namáhána. Další kontrolovaný parametr je délka doby přetavení, doporučená doba pro bezolovnaté pasty je alespoň 30-90 s nad 227 °C, Tuto hodnotu nesplnil T2, který naměřil i nejnížší maximální teplotu, proto je i úsek přetavení naměřený T2 kratší a nesplňuje doporučený interval. Poslední důležitý parametr, který je kontrolován je maximální rychlost ochlazení DPS, doporučený rozsah



je 1-4 °C/s. Tento doporučený interval byl splněn a na žádném termočlánku rychlost chlazení nepřesáhla 2 °C/s.

Z měření vyplývá, že rychlost přehřevu by bylo vhodné zvýšit teplotu v přetavovacích zónách č. 6 a č. 7 alespoň o 5 °C, teplotní profil tak dosáhne ideální hodnoty pro obě používané pájecí pasty a zároveň se touto úpravou prodlouží doba přetavení, která byla pro T2 vyhodnocena jako nedostačující.

## 8.5 Teplotní profil TP2 měřený na přetavovací peci Ersa 3/14



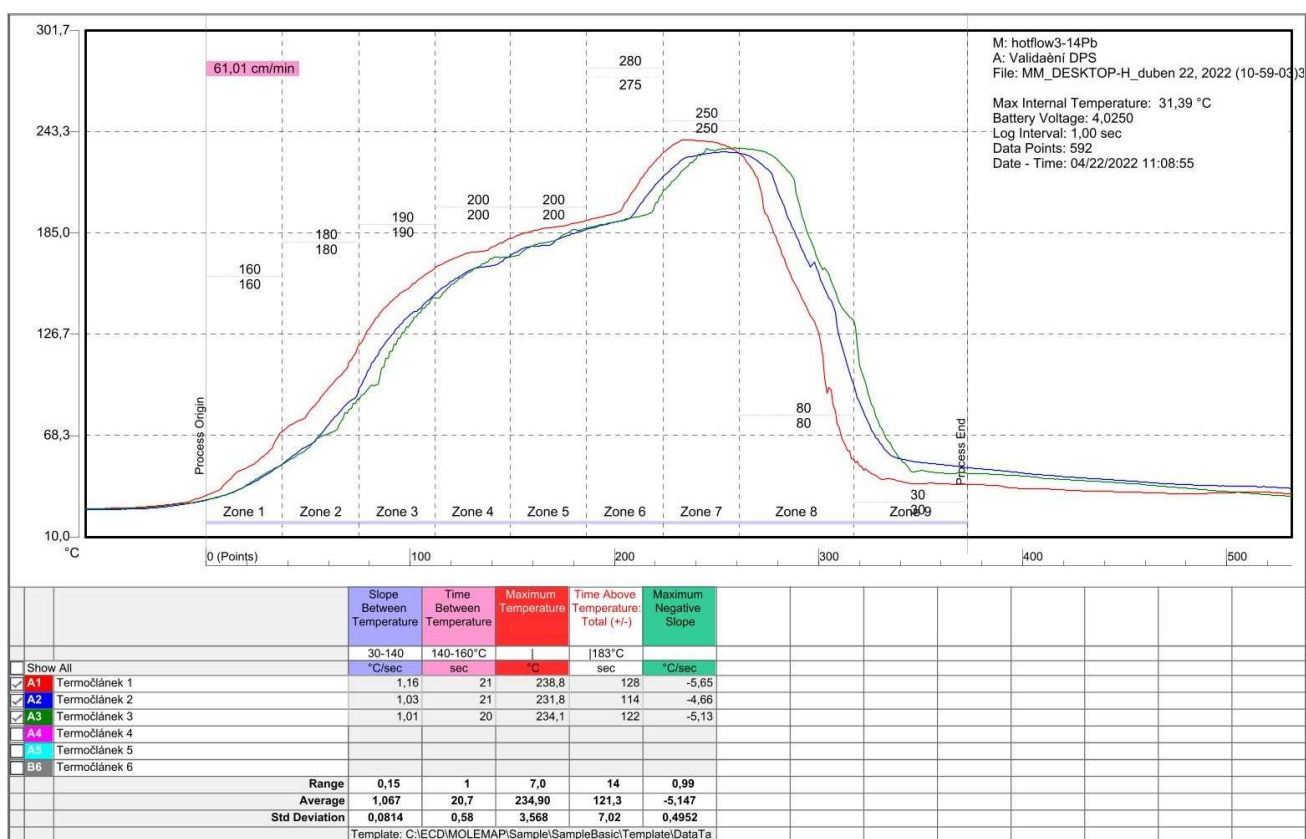
Obrázek 8.6 Teplotní profil TP2 měřený na peci Ersa 3/14

Další teplotní profil byl změřen TP2 na přetavovací peci Ersa 3/14, je určený pro DPS s vyšší zástavbovou hustotou. Validací DPS, na které byl teplotní profil měřen odpovídá střední zástavbové hustotě, to je nutné zohlednit při vyhodnocení. Jako první kontrolovaný parametr byla rychlost stoupaní teploty v oblasti předehřevu, která je pro bezolovnaté pasty doporučena v intervalu 1-2 °C/s. Tento interval teplotní profil splňuje. Další kontrovaná hodnota je doba trvání zóny vyrovnání, doporučená doba trvání pro bezolovnaté pasty je 30-90 s. Tento teplotní profil doporučený interval nespĺňuje ani na jednom ze tří termočláneků, to je zapříčiněno tím, že DPS s menší hustotou zástavby byla daleko rychleji ohřáta a v zóně č. 4 a č. 5, kde by mělo dojít k mírnému ustálení teploty a vytvoření takzvané oblasti vyrovnání, měla již DPS teplotu nad 180 °C. Proto by bylo vhodné snížit teplotu v zónách č. 2 a 3 alespoň o 10-15 °C. Jako další parametr k vyhodnocení je maximální teplota v oblasti přetavení, pro bezolovnaté pasty je podle tabulky vhodné nepřesáhnout teplotu 250 °C. Tato hodnota nebyla přesažena, nicméně teplota změřena pomocí T1 se kriticky blížila ke 250 °C. Dále byl kontrolován parametr délky trvání přetavovacího procesu, doporučená hodnota pro bezolovnaté pasty je 30-90 s. Naměřené hodnoty se pohybují téměř ideálně, lehce nad průměrem těchto hodnot. Posledním kontrolovaným parametrem byla maximální rychlost chlazení DPS, doporučená hodnota pro bezolovnaté pasty je 1-4 °C/s. Naměřené hodnoty tento interval

přesáhly více než o 50 %, pájené spoje na DPS by mohly být tímto rychlým poklesem teploty znehodnoceny nebo poškozeny.

Z měření teplotního profilu vyplývá, že je velmi složité nastavit správně teplotní profil pro DPS s hustým osazením, když měření teplotního profilu probíhalo pomocí DPS s malou hustotou osazení. Hodnoty, které pro DPS s malou hustotou osazení byly mimo doporučený interval, by pravděpodobně mohly být ideální pro DPS s velkou hustotou osazení.

## 8.6 Teplotní profil TP3 měřený na přetavovací peci Ersas 3/14



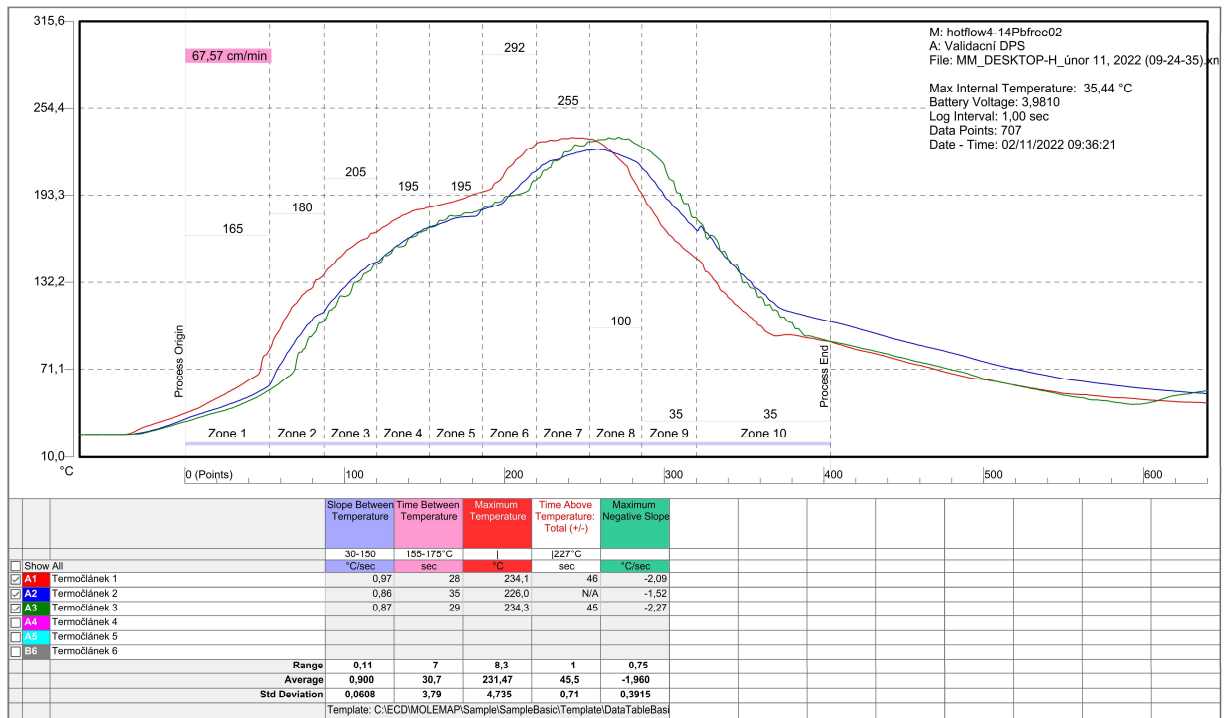
Obrázek 8.7 Teplotní profil TP3 měřený na peci Ersas 3/14

Poslední teplotní profil měřen na peci Ersas 3/14 byl TP3, tento teplotní profil je vhodný pro pájení olovnatých past. První kontrolovaný parametr je stoupání teploty v zóně předehřátí, doporučená strmost stoupání teploty je dle tabulky č. 7.2 1-2,5 °C/s. Naměřené hodnoty se pohybují u dolní hranice doporučeného intervalu, teplota v zóně č. 1 nemusí být v tomto případě upravována. Další kontrolovaný parametr je doba trvání oblasti vyrovnání, doporučený interval se pohybuje mezi 30 až 120 s. Naměřené hodnoty jsou pod spodní hranicí doporučeného intervalu, proto je nutné snížit teplotu v zóně č. 3 alespoň o 10 °C, prodlouží se tak doba, kdy DPS bude mít teplotu pod teplotou 160 °C.

Další kontrolovaný parametr je maximální teplota v zóně přetavení, doporučená maximální teplota je dle tabulky č. 7.2 v intervalu 205-225 °C. Naměřené hodnoty se pohybují téměř o 10 °C výše, než je dovoleno doporučeným intervalem, proto je nutné snížit teplotu v zóně č. 6 minimálně o 10 °C a v zóně č. 7 o 5 °C. Bude tak zaručeno že maximální teplota nevystoupá přes doporučených 225 °C. Další kontrolovaný parametr je délka trvání samotného procesu přetavení, kde doporučená hodnota je 30-90 s. Naměřené hodnoty přesáhly doporučený interval průměrně o 30 s, pro napravení této závažné chyby přispěje poslední změna, a to snížení teplot v tavicích zónách pece. Pokud předchozí úprava nebude dostačující musí se teplota ještě více snížit, jinak by došlo k nadměrné tvorbě IMC uvnitř pájeného spoje. Poslední kontrolovaný parametr je rychlost chlazení DPS, podle doporučených hodnot by rychlost neměla přesáhnout 3 °C/s. Naměřené hodnoty přesáhly maximální doporučenou hodnotu chlazení o 2 °C/s, proto je nutné zvýšit teplotu v chladicích zónách pece ideálně alespoň o 40 %, jinak by hrozilo poškození nově vzniklého pájeného spoje.

Z měření tedy vyplývá že je nutné snížit teplotu v zóně č. 3 a 6 minimálně o 10 °C a v zóně č. 7 o 5 °C, po těchto úpravách by měl teplotní profil odpovídat doporučeným hodnotám pro danou pájecí pastu a měřenou DPS.

## 8.7 Teplotní profil TP1 měřený na přetavovací peci Ersas 4/14

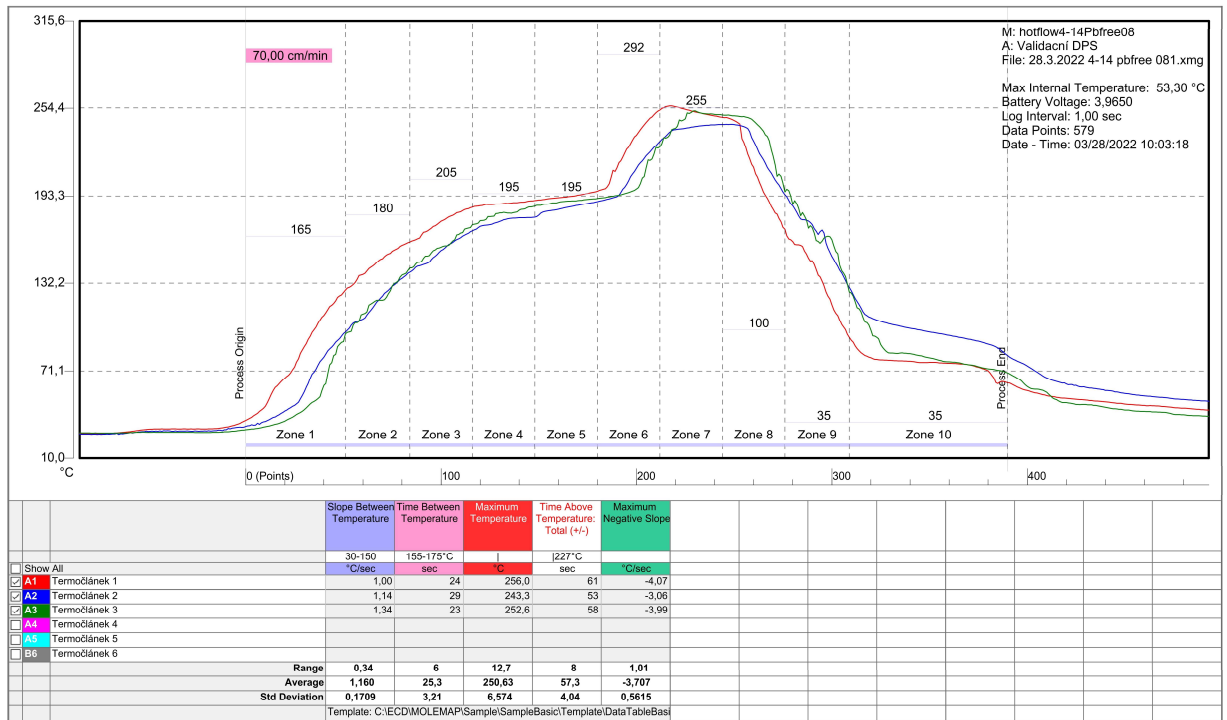


Obrázek 8.8 Teplotní profil TP1 měřený na peci Ersas 4/14

První teplotní profil měřen na peci Ersas 4/14 byl TP1. První kontrolovaný parametr je rychlost stoupání teploty v oblasti předehřevu, doporučená teplota v této oblasti je 1-2 °C/s. Naměřené hodnoty jsou těsně pod nejnižší hodnotou tohoto intervalu, proto by bylo vhodné zvýšit teplotu v zóně č.1 o 5-10 °C. Další kontrolovaný parametr je doba trvání zóny vyrovnání, kde doporučený interval doby trvání je 30-90 s. Naměřené hodnoty jsou pod spodní hranicí tohoto intervalu. Nevyhovují tedy doporučeným hodnotám. Tavidlo by tak nemělo dostatek času na očištění pájecích ploch, proto by bylo vhodné snížit teplotu v zóně č. 3 o 10 °C. Poté byla zkontrolována maximální teplota v oblasti přetavení, doporučená maximální teplota se pohybuje v intervalu od 235 °C až do 250 °C. Naměřené hodnoty nedosahují ani po dolní hranici tohoto intervalu, pájený spoj by tak nemusel být kvalitně zapájen, proto by bylo vhodné zvýšit teplotu v zóně č. 6 a č. 7 alespoň o 10 °C. Další byla kontrolována doba trvání přetavení pájecí pasty, doporučená doba je 30-90 s. Naměřené hodnoty tuto dobu nesplňují. V jednom případě nebylo ani dosaženo teploty 227 °C tedy teploty tavení, proto je nutné udělat již zmíněný krok, a to zvýšení teploty v oblasti přetavení. Poslední kontrolovaná hodnota je maximální rychlost chlazení, kde doporučená hodnota je 1-4 °C/s. Naměřené hodnoty se pohybují okolo hodnoty 2 °C/s, tedy doporučenou hodnotu splňují.

Celkově z měření vyplývá že přetavovací pec nemá dostatečnou teplotu pro kvalitní zapájení bezolovnaté pasty. Proto je nutné zvýšit teplotu v zóně č. 1 o 5-10 °C, v zóně č. 3 o 10 °C a v zóně č. 6 a 7 o 10 °C. Takto upravený teplotní profil by měl zajistit náležitě zapájení olovnaté pasty pro tuto validační DPS.

## 8.8 Teplotní profil TP2 měřený na přetavovací peci Ersas 4/14



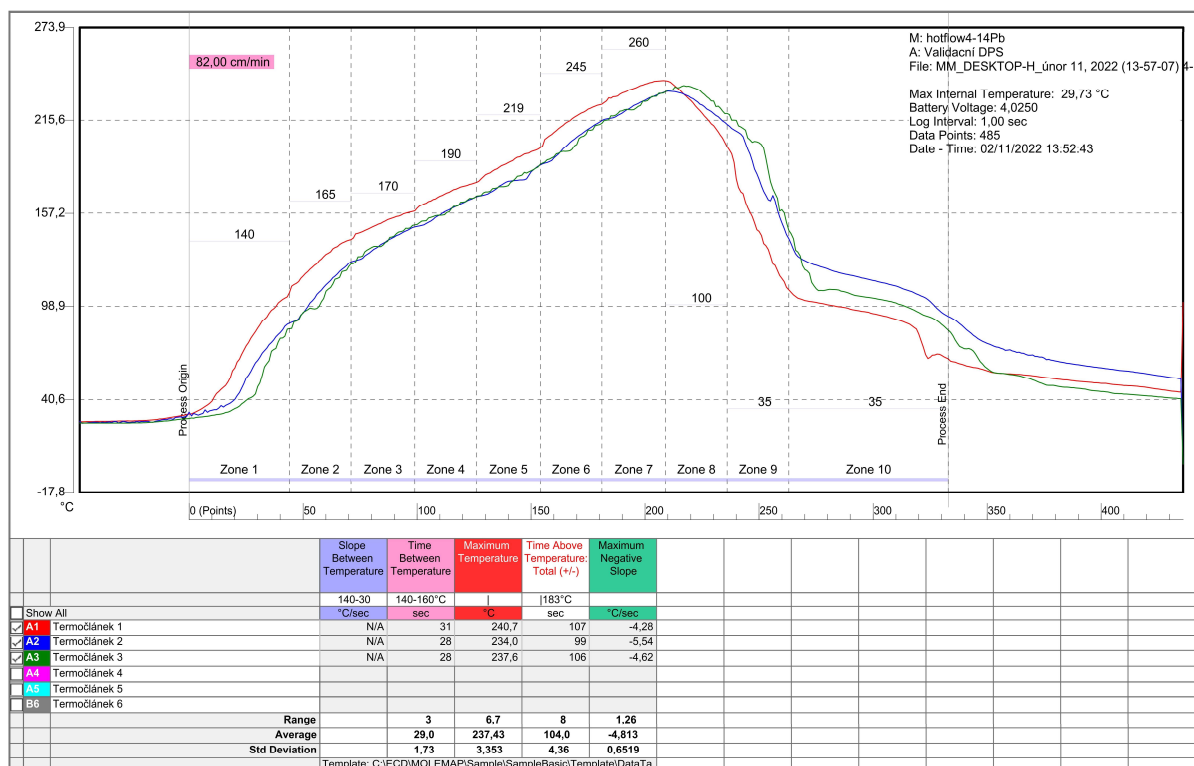
Obrázek 8.9 Teplotní profil TP2 měřený na peci Ersas 4/14

Další teplotní profil měřen na přetavovací peci Ersas 4/14 byl TP2. Přetavovací pec byla nastavena na teplotní profil vhodný pro bezolovnaté pájení s vysokou zástavbovou hustotou DPS TP2. První kontrolovaný parametr byla rychlost stoupaní v zóně předehřátí, doporučená hodnota z vytvořené tabulky č. 7.2 je v intervalu 1-2 °C/s. Naměřené hodnoty se blíží k dolní hranici doporučeného intervalu 1 C°/s, ale splňují ho, proto není nutné teplotu upravovat. Další kontrolovaný parametr je trvání oblasti vyrovnání, kde doporučený interval je od 30 s do 90 s. Naměřené hodnoty tento interval nespĺňují, tavidlo tak nemá dostatek času na očištění pájecích ploch. Bylo by proto vhodné snížit teplotu v zóně č. 3-5 o 10 °C, ovšem pokud bude brán v potaz, že je tento teplotní profil určen pro DPS s velkou hustotou osazení, mohlo by stávající nastavení odpovídat. Dále byla zkontrolována maximální teplota v zóně přetavení, pro kterou je doporučen interval maximální teploty 235-250 °C. Naměřené teploty na T1 a T3 doporučenou teplotu překročily, proto by bylo vhodné snížit teplotu v zóně č. 6 o 5-10 °C. Následně byla kontrolována doba trvání přetavení, doporučená hodnota je v intervalu od 30 s do 90 s.

Naměřené hodnoty jsou ideálně uprostřed doporučeného intervalu. Jako poslední byla kontrolována maximální rychlost chlazení DPS, doporučená hodnota je 1-4 °C/s. Naměřená hodnota na T1 překročila doporučený interval a hodnota naměřená na T2 je také na hraně doporučeného intervalu. Bylo by proto vhodné zvýšit teplotu v chladicích zónách pece alespoň o 10 °C, nedocházelo by pak ke zbytečnému teplotnímu namáhání DPS.

Z měření vyplývá že pro validační DPS, na které bylo měření provedeno, je teplotní profil příliš agresivní a mohlo by dojít k destrukci součástek s malou tepelnou kapacitou. Teplotní profil TP2 je určen pro DPS s vysokou zástavbovou hustotou, proto ve většině kontrolovaných parametrů nesplňuje požadované hodnoty, proto by bylo vhodné provést měření přímo na konkrétní DPS, pro kterou bude teplotní profil určen.

## 8.9 Teplotní profil TP3 měřený na přetavovací peci Erska 4/14



Obrázek 8.10 Teplotní profil TP3 měřený na peci Erska 4/14

Jako poslední na přetavovací peci Erska 4/14 byl změřen teplotní profil určený pro olovnatou pájecí pastu TP3. První kontrolovaný parametr je rychlost stoupaní teploty v předehřívací zóně, doporučená hodnota z vytvořené tabulky č. 7.2 je v intervalu od 1-2,5 °C/s. Naměřené hodnoty jsou na začátku tohoto intervalu, teplotní profil tedy doporučenou rychlost stoupaní teploty splňuje. Dalším kontrolovaným parametrem byla

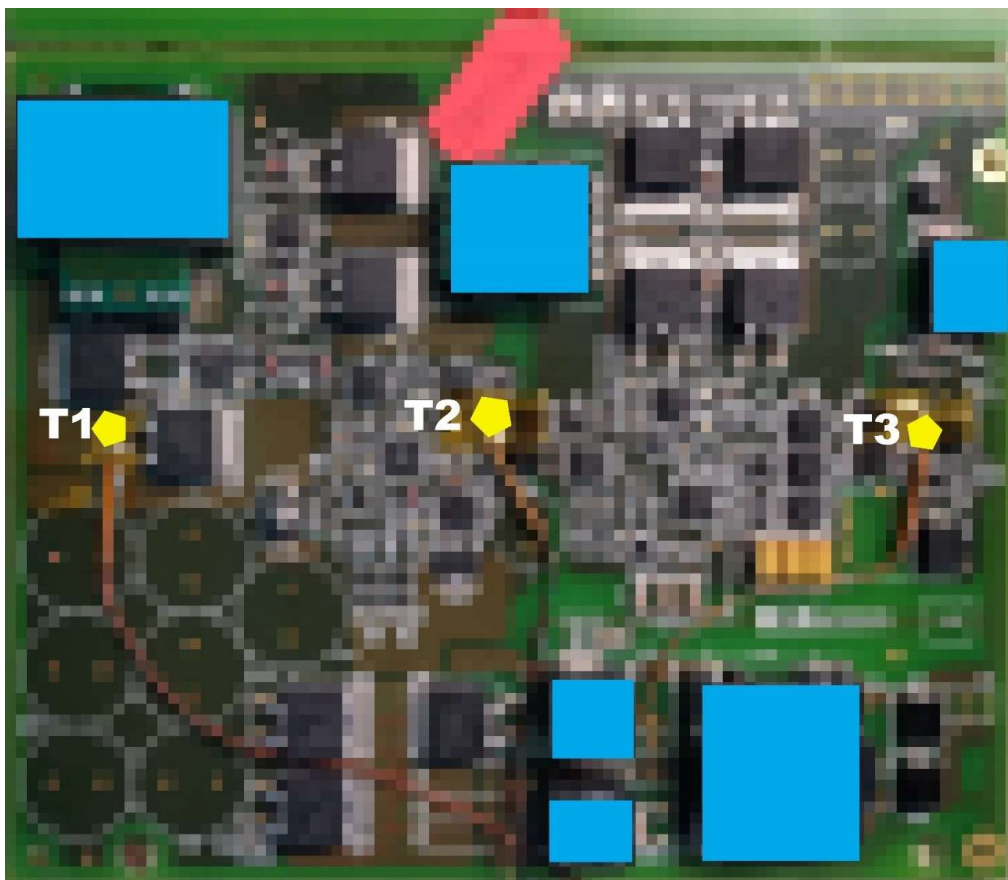
doba trvání zóny vyrovnání, která je doporučena v intervalu mezi 30-120 s. Naměřené hodnoty jsou těsně pod spodní hranicí 30 s, proto by bylo vhodné snížit teplotu v zóně č. 3 a č. 4 alespoň o 10 °C. Došlo by pak ke zpomalení růstu teploty a prodloužení zóny vyrovnání, tavidlo by tak mělo dostatek času na očištění pájecích ploch. Následně byla kontrolována maximální teplota při přetavení pájecí pasty, doporučená maximální teplota je v intervalu od 205 °C do 225 °C. Naměřené hodnoty překračují doporučenou maximální teplotu až o 15 °C, to by mohlo velmi urychlit tvorbu IMC a ta by výrazně znehodnotila pájený spoj. Proto by bylo vhodné snížit teplotu v zóně č. 6 o 10 °C a v zóně č. 7 o 20 °C, bylo by tak zaručeno splnění doporučeného intervalu pro maximální teplotu. Dále byla zkontrolována doba trvání procesu přetavení, která je doporučena intervalem 60-90 s. Naměřené hodnoty přesahují doporučené až o 17 °C, to by mohlo negativně ovlivnit tvorbu IMC a mohlo by dojít k předčasnému odpaření tavidla. Tato chyba bude pravděpodobně vyřešena předešlou úpravou teplot v přetavovací části pece, jelikož dojde ke snížení maximální teploty, bude pak i čas přetavení kratší. Poslední kontrolovaný parametr je maximální rychlost chlazení DPS, doporučená hodnota je 1-3 °C/s. Doporučená hodnota je na T3 přesažena až o 2,5 °C/s, to by pravděpodobně vedlo ke znehodnocení pájeného spoje, je proto nutné snížit rychlost ventilátorů v chladicí zóně alespoň o 30 %, k dosažení požadované rychlosti chlazení také napomůže snížení předešlé snížení maximální teploty.

Z měření tedy vyplývá, že je nutné snížit teplotu v zóně č. 3 a č. 4, z důvodu dodržení doporučených teplot pro oblast vyrovnání. Dále je nutné snížit teplotu v zóně č. 6 o 10 °C a v zóně č. 7 o 20 °C, z důvodu zabránění překročení maximální teploty, snížení trvání doby přetavení, a snížení maximální rychlosti chlazení. Jako poslední je doporučeno snížit rychlost ventilátorů v chladících zónách alespoň o 30 %, aby došlo ke snížení rychlosti ochlazení DPS.



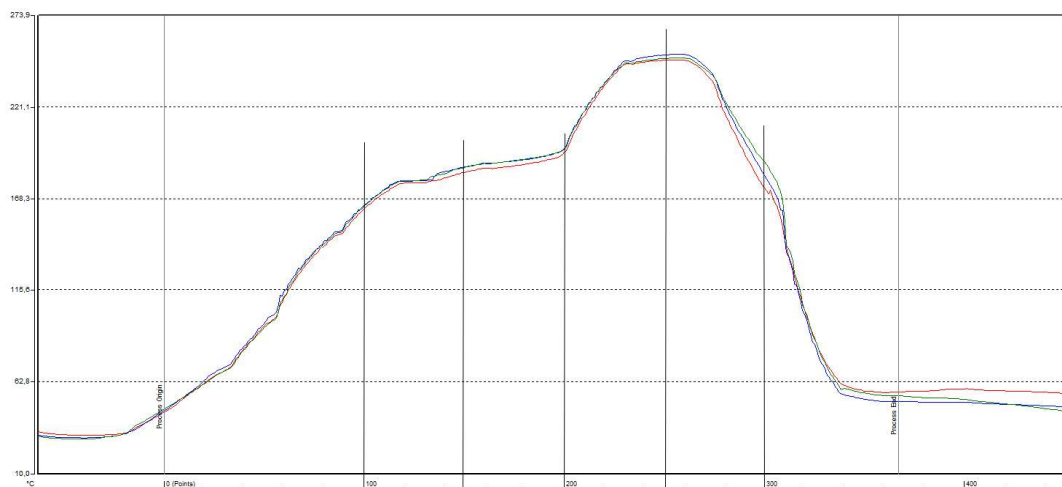
## 9. MĚŘENÍ PŘÍČNÉHO TEPLOTNÍHO PROFILU

Pro měření teplotního profilu bylo nejdříve nutné vybrat vhodnou DPS, pro testovací měření byla vybrána vyřazená DPS z výroby. Jako další krok bylo nutné nalézt tři vhodná místa pro termočlánky. Termočlánky musí být umístěny v jedné rovině u součástek se stejnou tepelnou kapacitou. Termočlánky byly umístěny na pájecí plošky rozměrově stejných SMD rezistorů, termočlánky nejsou v naprosté rovině, pozice jsou o 1-2 mm rozdílné z důvodu priority umístit termočlánky na stejné součástky (jelikož termočlánek jako takový má velmi malou tepelnou kapacitu, musely být připevněn na stejné součástky na úkor nepatrnému vychýlení z roviny). Termočlánky byly nejdříve připájeny pomocí bezolovnaté pájecí slitiny na plošky zvolených rezistorů, následně byly ohnuty přívodní vodiče do ideálních tvarů, aby mohly být připevněny pomocí měděných drátků skrz pájecí otvory po neosazených součástkách. Jako poslední byla přidána kaptonová páska, kterou byly překryty termočlánky v místech zapájení. Termočlánky na místě drží měděné drátky a kaptonová páska, pájecí slitina zde pouze představuje tepelné spojení termočlánek s rezistorem. Vzhledem k autorským právům musí být zákaznickova DPS cenzurovaná, modré objekty představují součástky s velkou tepelnou kapacitou, žluté pětiúhelníky představují umístění termočláneků.



Obrázek 9.1 DPS použitá na měření příčného teplotního profilu

## 9.1 Příčný teplotní profil měřený na přetavovací peci Ersa3/14

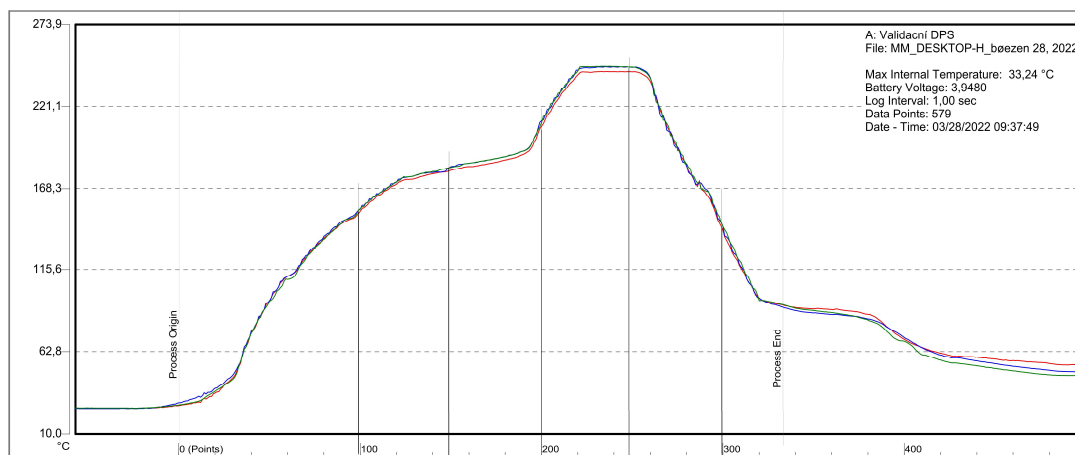


	Maximální teplota [°C]	Teplota v čase [°C]	Teplota v čase [°C]	Teplota v čase [°C]	Teplota v čase [°C]	Teplota v čase [°C]
		Čas = 100	Čas = 150	Čas = 200	Čas = 250	Čas = 300
T1	248,4	163	184	195	248	175
T2	251,8	165	187	198	251	182
T3	249,7	165	186	197	249	190
Průměr	249,97	164,3	185,7	196,7	249,3	182,3

Tabulka 9.1 Příčný teplotní profil Ersa 3/14

Na přetavovací peci Ersa 3/14 byl naměřen příčný teplotní profil. Používaný program M.O.L.E. Map bohužel nedisponuje vhodným nástrojem pro kontrolu příčného teplotního profilu, proto bylo nutné přepsat jednotlivé teploty do excelu, kde je vyhodnocení přehlednější. Do grafu teplotního profilu byly vyneseny přímkové čáry, které napomáhají orientaci v grafu. Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvyšší hodnota teploty na DPS byla krom posledního měření (oblast chlazení) vždy uprostřed měřené DPS, tedy na termočlánek č. 2, protože uprostřed DPS nedochází k takové cirkulaci dusíku. Je zde teplota vyšší než na okrajích DPS, pravý okraj DPS (T3) je na okraji pece, proto je zde naměřená teplota vyšší než na druhém okraji DPS (T1), který je v podstatě nejbližší k prázdnému prostoru v peci, kde dochází k velké cirkulaci dusíku. Nejvyšší rozdíl teplot vzniká mezi T1 a T3 v čase 300 s, kde je rozdíl až 15 °C. Tento rozdíl teplot může být vzniklý díky mechanickému poškození chladicí zóny, znečištěním chladicích vývodů nebo vznikem vírů teplých proudů uvnitř pece. Nalezený problém bude řešen s obsluhou přetavovací pece. V ostatních případech se rozdíl teplot mezi jednotlivými termočlánci pohybuje okolo 1-3 °C.

## 9.2 Příčný teplotní profil měřený na přetavovací peci Ers4/14

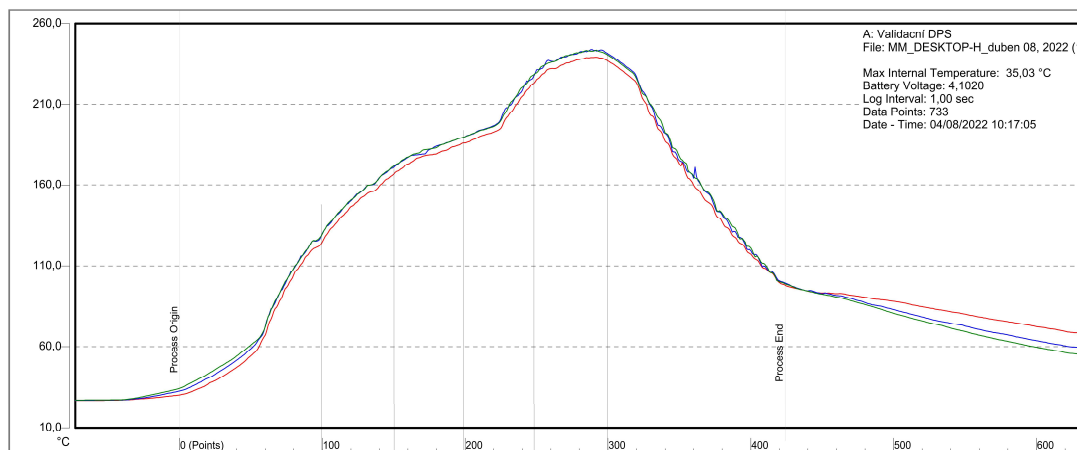


	Maximální teplota [°C]	Teplota v čase [°C] Čas = 100	Teplota v čase [°C] Čas = 150	Teplota v čase [°C] Čas = 200	Teplota v čase [°C] Čas = 250	Teplota v čase [°C] Čas = 300
T1	243,6	153	180	208	243	141
T2	246,6	155	183	212	246	143
T3	246,9	155	182	211	246	143
Průměr	245,7	154,3	181,7	210,3	245	142,3

Tabulka 9.2 Příčný teplotní profil Ers4 4/14

Příčný teplotní profil měřený na peci Ers4 4/14 dosahuje maximálnímu rozdílu teplot mezi T1 a T2 v čase 200 s a to konkrétně 4 °C. Tento rozdíl není nikterak velký, aby ovlivnil výslednou kvalitu pájeného spoje. V ostatních případech kolísá rozdíl teploty mezi jednotlivými termočlánky mezi 1-3 °C, to znamená, že přetavovací pec Ers4 4/14 je téměř homogenní.

### 9.3 Příčný teplotní profil měřený na pletavovací peci Ersa2/12



	Maximální teplota [°C]	Teplota v čase [°C] Čas = 100	Teplota v čase [°C] Čas = 150	Teplota v čase [°C] Čas = 200	Teplota v čase [°C] Čas = 250	Teplota v čase [°C] Čas = 300
T1	239,5	125	167	186	225	237
T2	244,2	130	171	190	232	242
T3	243,8	130	172	190	230	241
Průměr	242,5	128,3	170	188,7	229	240

Tabulka 9.3 Příčný teplotní profil Ersa 2/12

Příčný profil měřený na pletavovací peci Ersa 2/12 dosahuje maximálního rozdílu teplot mezi termočlánkem T1 a T2 v čase 250 s konkrétně 7 °C. Tento rozdíl teplot je v mezích tolerance, jelikož se jedná o nejstarší pletavovací pec ve firmě (stáří přes 15 let) je tato odchylka očekávaná. V ostatních případech se rozdíly teplot pohybují od 1-5 °C, proto lze pletavovací pec považovat stále za spolehlivou.

## 10. NÁVRH DRŽÁKŮ PRO MĚŘENÍ

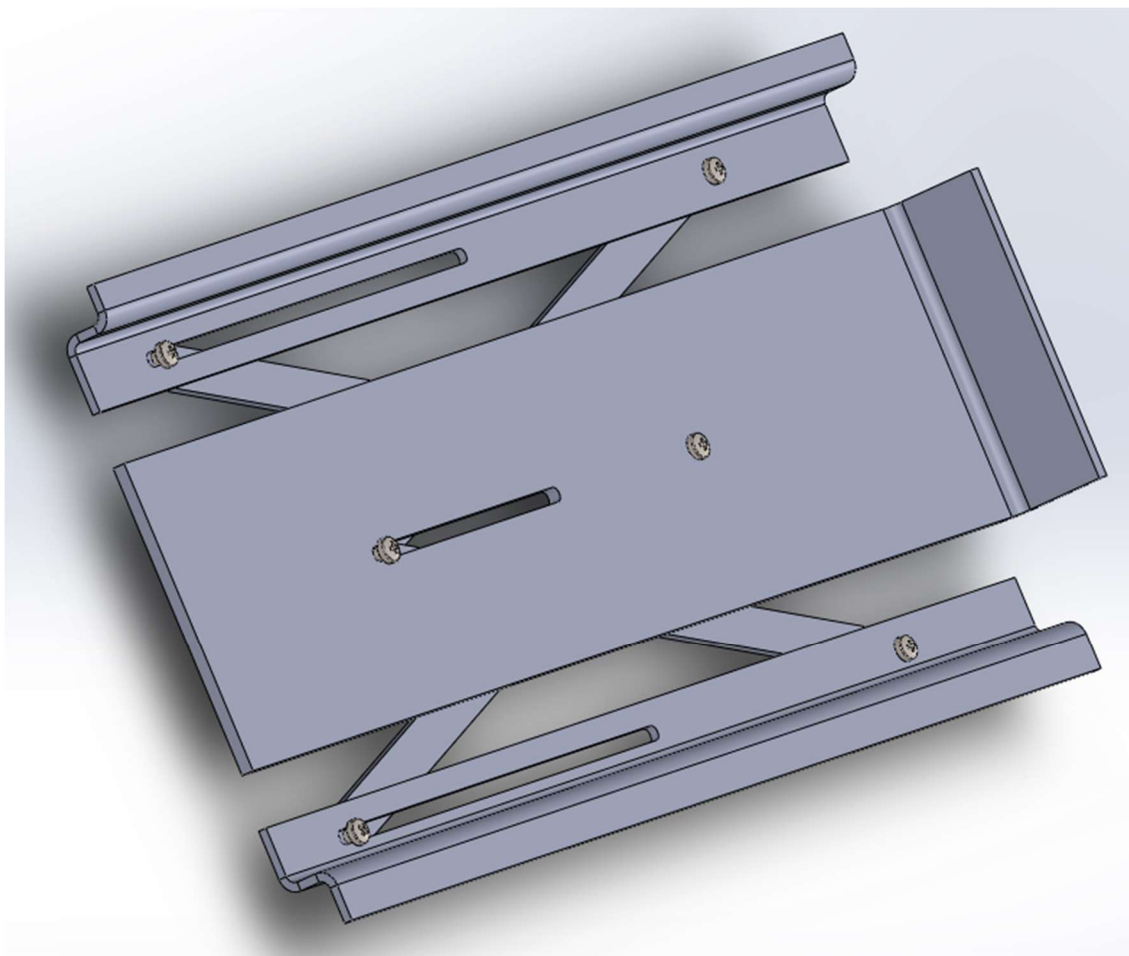
Z předchozího měření a konzultace s hlavním technologem firmy byl vyvozen závěr, že by bylo nejvhodnější požadovat po každém zákazníkovi jednu DPS navíc, na které by mohlo být provedeno měření teplotního profilu a nastavit na míru teplotní profil konkrétní DPS. Pro takové měření je nutné navrhnout držák jak pro samotný profilometr, tak i pro DPS. Cílem tohoto návrhu je získat možnost měřit DPS od šířky několika centimetrů až po šířku několika desítek centimetrů.

### 10.1 Držák profilometru SuperM.O.L.E. Gold2

Při návrhu držáku na profilometr bylo nejdříve nutné zjistit parametry, které budou určovat samotné rozměry držáku. První z omezení tvoří samotné pece, jelikož bude navrhován pouze jeden držák, musí být kompatibilní se všemi pecemi (Ersa 2/12, 3/14, 4/14) a každá pec disponuje jiným rozpětím výšky/hloubky přetavovacího tunelu. Druhé omezení je samotný rozměr profilometru.

Výsledkem návrhu je držák profilometru, díky kterému je možné měřit DPS od téměř šířky samotného profilometru (zhruba 12 cm), tedy od co nejužšího rozpětí držáku, až po největší rozpětí zhruba 30 cm. Touto možností je pokryta většina vyráběných DPS ve firmě. Pro DPS, které mají šířku menší než 12 cm, je nutné vyrobit zmíněný držák.

Samotný držák byl navrhnout pomocí programu solidworks. Držák se skládá ze tří nosných dílů. Z toho jeden hlavní nese samotný profilometr a další dva díly jsou ližiny, které jsou spojeny s hlavním dílem pomocí pohyblivých ramen. Díky volnému spojení ramen a nosných dílů je možné nastavit požadovanou šířku a utažením šroubků ji zafixovat. Pro případnou výrobu byly vytvořeny technické dokumenty, které budou přiloženy v příloze bakalářské práce.

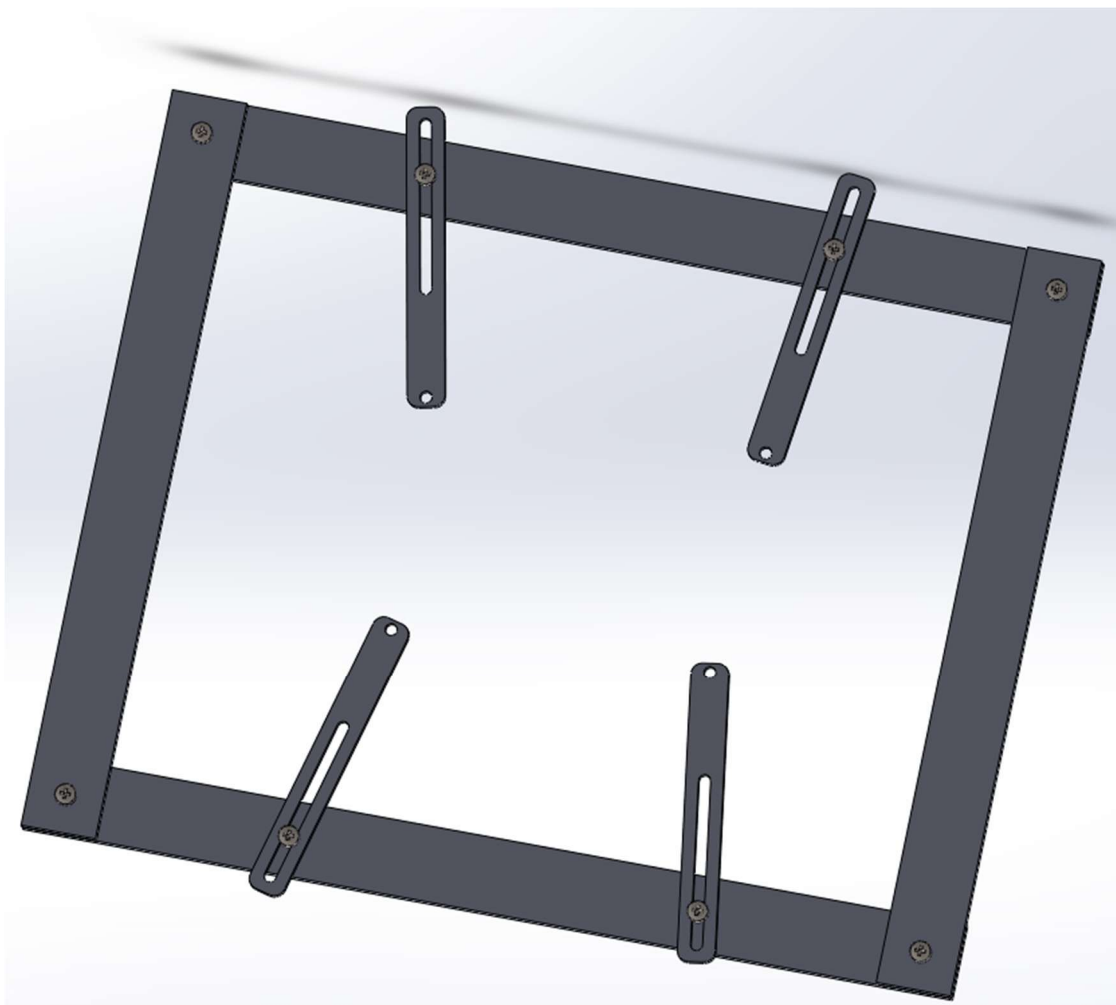


Obrázek 10.1 Návrh držáku pro profilometr SuperM.O.L.E. Gold 2

## 10.2 Držák DPS

Držák DPS musel být navrhnout díky občasné produkci DPS se šířkou menší než 12 cm. Držák se skládá z obdélníkové konstrukce vyrobené z ocelového plechu. Obdélníková konstrukce je 20 cm široká, tudíž ideální velikost pro využití držáku pro profilometr. Z obdélníkové konstrukce vystupují nastavitelná ramena z oceli, aby došlo k co nejmenšímu tepelnému ovlivnění samotné DPS při prováděném měření. Na konci těchto ramen by byla umístěna malá krokosvorka, která by šetrně držela DPS.

Tento držák by byl schopen uchytit DPS širokou až pouze 5 cm, to je v podstatě limit dopravníku přetavovací pece.



Obrázek 10.2 Držák DPS

## 11. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zpracování problematiky týkající se pájení přetavením, provedení série měření na jednotlivých přetavovacích pecích a jejich následné vyhodnocení, navrhnutí držáku na profilometr a DPS.

V teoretické části je vysvětleno, co je to pájený spoj, čím může být ovlivněna kvalita pájeného spoje a následné rozdělení pájecích past. V další části byl rozebrán teplotní profil, rozdělení teplotních profilů, jejich výhody a nevýhody a samotný způsob jejich měření. Závěr teoretické části se věnoval defektům vzniklých při procesu pájení, jednotlivých povrchových úprav DPS a možnostem přetavení pájecí pasty.

Začátek praktické části je zaměřen na vytvoření kontrolních parametrů pro nastavené teplotní profily a konkrétní používané pájecí pasty, dále je zde rozebráno konkrétní nastavení jednotlivých přetavovacích pecí.

Další část obsahuje samotné jádro práce, devět měření pro tři různá nastavení pece a pro tři různé přetavovací pece. Výsledky měření jsou vyhodnoceny s velmi podrobným vysvětlením jednotlivých objevených chyb a jejich opravení. Obecně lze konstatovat, že všechny měřené profily mají příliš krátkou oblast vyrovnání teplot, proto tavidlo nemá dostatek času na očištění pájecích ploch, to může způsobit řadu defektů. Teplotní profil TP3 má příliš vysokou teplotu v oblasti přetavení, a to na všech měřených pecích. TP1 je určen pro DPS s nízkou zástavbovou hustotou, TP2 je určen pro DPS s vysokou zástavbovou hustotou a validační DPS, pomocí které bylo měření prováděno, je podle výsledků měření, DPS se střední zástavbovou hustotou. Krásně tedy demonstruje fakt, že není možné mít několik přednastavených teplotních profilů pro různé DPS a požadovat, aby teplotní profily splňovaly doporučená data od výrobců pájecích past. Na všech měřeních teplotního profilu TP1 je příliš nízká teplota na termočlánek T2, který je umístěn blízko součástky s vysokou teplotní kapacitou. Naopak na všech měřeních u teplotního profilu TP2 je příliš vysoká teplota na termočlánek T1, který je umístěn mezi malými součástkami s nízkou teplotní kapacitou. Z měření vyplývá, že pro nastavení správného teplotního profilu je nutné měřit teplotní profil na konkrétní DPS, kterou chceme vyrábět.

V další části je popsána kontrola homogenity přetavovacích pecí pomocí měření příčného teplotního profilu. Přetavovací pec Erska 2/12 je nejstarší, a proto má největší rozptyl teplot mezi termočlánci 1-7 °C, přetavovací pec Erska 3/14 má rozptyl teplot 1-3 °C a v čase měření 300 s je mezi T1 a T3 rozdíl teplot 15 °C, přetavovací pec Erska 4/14 je nejnovější z uvedených a rozptyl teplot je 1-3 °C.

V poslední části byly navrženy držáky pro profilometr a DPS. Držáky jsou navrženy tak, aby pokryly širokou variabilitu rozměrů DPS, které by bylo nutné měřit. V ideálním případě bude technolog moci změřit teplotní profil při každé nové sérii výroby DPS, enormně se tak zlepší kvalita pájených spojů a sníží se výskyt defektů.



## LITERATURA

- [1] STARÝ, J; KAHLE, P. Plošné spoje a povrchová montáž. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 208 s.
- [2] RŮŽIČKA, M., Sledování rychlosti roztékání pájky po kovovém povrchu. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2012, 67 s. 6 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [3] KUČERA, L., Smáčení a roztékání roztavené pájky po kovovém povrchu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 77 s. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [4] AIM M8 – SAC305. BLT circuit services [online]. 2021 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://bltcircuitservices.co.uk/product/aim-m8/>
- [5] Liu, Yang & Meerwijk, Joost & Liangliang, Luo & Zhang, Honglin & Sun, Fenglian & Yuan, Cadmus & Zhang, G.Q.. (2014). Formation and evolution of intermetallic layer structures at SAC305/Ag/Cu and SAC0705-Bi-Ni/Ag/Cu solder joint interfaces after reflow and aging. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 25. 10.1007/s10854-014-2257-8.
- [6] HUSÁK, Jiří. Měření pájitelnosti metodou smáčecích vah při tenzi par [online]. Praha, 2016 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61182/F3-BP-2015-Husak-Jiri-BP%20Jiri%20Husak-Pajitelnost%20odevzdana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. České vysoké učení technické.
- [7] JAKOUBEK, Jakub. Optimalizace pájecích profilů u průběžné přetavovací pece [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/23144/1/Optimalizace%20pajecich%20profilu%20u%20prubezne%20pretavovaci%20pece%20-%20Jakoubek.pdf>. Západočeská univerzita v Plzni.
- [8] V čem nám může pomoci pájení v parách. PBT Rožnov [online]. Rožnov pod Radhoštěm [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/clanky/v-cem-nam-muze-pajeni-v-parach>
- [9] HOTFLOW 4/14. Kurtz ersa [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <http://kurtzrsa.com.cn/electronics-production-equipment/soldering-machines/reflow-soldering/produkt-details/hotflow-420-2.html>
- [10] Solder Bridging. SURFACE MOUNT PROCESS [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.surfacemountprocess.com/through-hole-troubleshooting-guide.html>
- [11] Tombstone During PCB SMT Process. Jycircuitboard [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.jycircuitboard.com/news/tombstone-during-pcb-smt-process-299.html>

- [12] Solder balling test. Almit [online]. [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.almit.de/terminologie-des-Lotens/compendium.php?id=215>
- [13] Bruno, Lars & Gustafson, Benny. (2019). Head-on-Pillow Defect Detection: X-Ray Inspection Limitations. *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*. 16. 91-102. 10.4071/imaps.871613.
- [14] Povrchová úprava. Gatema [online]. [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: [https://www.gatema.cz/file-link/povrchove-upravy.pdf?\\_ga=2.239671556.609859696.1638270269-1566928207.1638270269](https://www.gatema.cz/file-link/povrchove-upravy.pdf?_ga=2.239671556.609859696.1638270269-1566928207.1638270269)
- [15] Vliv povrchových úprav DPS na pájitelnost [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2021-12-02]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18872/1/BP\\_Hoch\\_Petr.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18872/1/BP_Hoch_Petr.pdf). Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Martin Hirman.
- [16] SuperM.O.L.E.® Gold 2. ECD [online]. [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: <https://www.ecd.com/portals/5/products/supermolegold2/SuperMOLE-Gold-2-Datasheet.pdf>
- [17] SnAg3Cu05 [online]. [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: <https://www.inventecusa.com/assets/ecorel-free-305-6405-6.pdf>
- [18] Sn100C [online]. [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: [http://nihonsuperior.co.jp/english/wp-content/themes/nihonsuperior/pdf/pdoduct/download/catalog/paste/catalog\\_sn100c\\_p506d4\\_eng.pdf](http://nihonsuperior.co.jp/english/wp-content/themes/nihonsuperior/pdf/pdoduct/download/catalog/paste/catalog_sn100c_p506d4_eng.pdf)
- [19] Pájecí pasta Sn63Pb37 [online]. [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: [https://aimsolder.com/sites/default/files/nc256\\_sn62\\_and\\_sn63\\_solder\\_paste\\_tds.pdf](https://aimsolder.com/sites/default/files/nc256_sn62_and_sn63_solder_paste_tds.pdf)
- [20] Pájecí pasta Sn62Ag2Pb36 [online]. [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: <https://webbuilder3.asiannet.com/ftp/2173/SH-6209RMA-TDS-E.pdf>
- [21] LAUKO, Bc. Marek. PÁJECÍ SLITINY A JEJICH VLASTNOSTI [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68608/F3-DP-2017-Lauko-Marek-Pajeci%20slitiny%20a%20jejich%20vlastnosti.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČVUT.
- [22] FILÁKOVÁ, Denisa. Technologie pájení přetavením [online]. Zlín, 2010 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/11540/fil%3%a1kov%3%a1\\_2010\\_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/11540/fil%3%a1kov%3%a1_2010_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati.
- [23] 4,5kw SMT LED infračervená přetavovací pec. MingYan [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <http://french.smtpickandplacemachines.com/sale-7513666-led-4-5kw-infrared-smt-reflow-oven-960mm-300mm-reflow-soldering-oven.html>
- [24] AN1902. NXP [online]. [cit. 2021-10-02]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN1902.pdf>
- [25] BALÁK, M. Výroba a kalibrace termočlánků. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

2016. 45stran. Vedoucí bakalářské práce Ing. Štěpán Foral.  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=157942](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=157942)
- [26] STRAPKO, J. Mení teplotních profil SMD pouzder . Brno: Vysoké uení technické v Brne, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 94 s. Vedúci diplomovej práce Ing. Jií Starý, Ph.D.
- [27] MIERŽWINSKÝ, L. Optimalizace teplotních profilů na zařízení IR-400 . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Alexandr Otáhal.
- [28] SuperM.O.L.E.® Gold 2. In: ECD M.O.L.E.® MAP V3.21 - Users Help System 4.7.0 [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z:  
[https://www.ecd.com/portals/5/products/megamolemap/help/mmmmap\\_smg2\\_equipment.htm](https://www.ecd.com/portals/5/products/megamolemap/help/mmmmap_smg2_equipment.htm)
- [29] CHLOUPEK, T. Hodnocení materiálových a procesních faktorů na DPS metodou smáčecích vah. Brno, 2009. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D. FEKT VUT v Brně
- [30] GRAMETBAUER, Michal. Tavidla pro bezolovnaté pájení a jejich vliv na spolehlivost [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z:  
<https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/12397>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Steiner, František.

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:	DPS	Deska plošných spojů
	SAC305	Pájecí pasta SnAg3Cu05
	RTS	Ramp to Spike
	RSS	Ramp Soak Spike
	ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold
	OSP	Organic Solder Preservatives
	HAL	Hot Air Solder Levelling
	IMC	InterMetallic Compound

# **SEZNAM PŘÍLOH**

**PŘÍLOHA A – TECHNICKÝ VÝKRES DRŽÁKU PROFILOMETRU**

**PŘÍLOHA B – TECHNICKÝ VÝKRES DRŽÁKU DPS**