

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2023

František Kudláček



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

BEZOLOVNATÝ PÁJENÝ SPOJ A ENVIRONMENTÁLNÍ VLIVY

LEAD FREE SOLDER JOINT AND ENVIRONMENTAL ASPECTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

František Kudláček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2023



Bakalářská práce

Bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: František Kudláček

ID: 201794

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Bezolovnatý pájený spoj a environmentální vlivy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku nízkoteplotních bezolovnatých pájecích slitin a povrchových úprav DPS. Navrhněte zkušební DPS metodiku vytvoření a měření pájených spojů. Sledujte změny odporu pájených spojů i růstu intermetalické vrstvy za působení různých environmentálních vlivů v časové ose. Vyhodnoťte a diskutujte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 1.6.2023

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedo voleným 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

Cílem této bakalářské práce je zjistit vliv nízkoteplotní bezolovnaté pájky při procesu stárnutí. V teoretické části jsou rozebrány druhy bezolovnatých pájek a pájecí pasty používané pro výrobu elektrických obvodů. V praktické části se zabýváme návrhem a měřením dané DPS. Pro naši analýzu věnujeme větší pozornost pájecí pastě typu Sn42Ag1Bi57 a jejímu teplotnímu profilu, včetně pozorování preforem s vyšší teplotou tavení. K vyhodnocování je použita čtyřbodová metoda měření, která nám zobrazí daný rozdíl mezi naměřenými hodnotami.

Klíčová slova

DPS, pájecí pasta, teplotní profil, pájení, přetavení, čtyřbodová metoda

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to determine the effect of low-temperature lead-free solder during the aging process. The theoretical part deals with the types of lead-free solders and solder pastes used for the production of electrical circuits. In the practical part we deal with the design and measurement of the PCB. For our analysis, we pay more attention to the solder paste type Sn42Ag1Bi57 and its temperature profile. A four-point measurement method is used for evaluation, which shows us the difference between the measured values.

Keywords

PCB, solder paste, temperature profile, soldering, reflow, four-point method

Bibliografická citace

KUDLÁČEK, František. *Bezolovnatý pájený spoj a environmentální vlivy*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151286>. 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: *František Kudláček*

VUT ID studenta: *201 794*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2022/23*

Téma závěrečné práce: *Bezolovnatý pájený spoj a environmentální vlivy*

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.

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a celkovou aktivitu při zpracování mé bakalářské práce a také za návrh tohoto experimentu. Firmě RESIDEO-Honeywell, za investici do projektu a pomoc při výrobě.

Dále bych chtěl poděkovat Bc. Ladislavu Hruškovi, za pomoc s návrhem plošného spoje.

Obsah

Seznam obrázků	10
Seznam tabulek.....	11
1 Bezolovnaté pájení.....	13
1.1 Bezolovnaté pájky	13
1.2 Přehled nejčastějších druhů slitin bezolovnatých pájek	14
1.2.1 Preformy Sn96,5Ag3Cu0,5 (SAC)	15
1.2.2 Pájka Sn/Ag/Cu (SAC)	15
1.2.3 Pájka Sn/Ag (SA).....	15
1.2.4 Pájka SnBi (SB).....	16
1.3 Typy pájecí pasty.....	16
1.3.1 Pájecí pasta SnBi - PF602-P30-T4.....	16
1.3.2 Pájecí pasta SnAgBi - NC273LT	17
1.3.3 Pájecí pasta SAC3-XF3	17
1.4 Pájení pájecích past	17
1.5 Teplotní profil	19
1.6 Rozdělení teplotních profilů	19
1.6.1 Příčný teplotní profil	19
1.6.2 Podélný teplotní profil	20
1.6.3 RSS (Ramp Soak Spike)	20
1.6.4 RTS (Ramp To Spike)	20
1.6.5 Fáze u teplotního profilu	21
1.7 Tavidla v pájecí pastě	21
1.8 Čtyřbodová metoda	22
1.9 Stárnutí a enviromentální vlivy	23
1.9.1 Klimatické komory.....	23
1.9.2 Tepelná komora.....	23
1.9.3 Šoková teplotní komora	23
2 Praktická část.....	24
2.1 Prototyp DPS.....	24
2.2 Výroba DPS	26

2.3	Tisk pájecí pasty, osazení a přetavení	26
2.4	Stárnutí v klimatických podmínkách.....	31
2.5	Tabulky naměřených hodnot.....	32
2.5.1	Grafické znázornění naměřených hodnot.....	37
2.5.2	Vyhodnocení naměřených hodnot	40
2.6	Mikrovýbrusy	40
2.6.1	Zhotovení mikrovýbrusu	40
2.6.2	Pozorování pájecí pasty a oblast voidů pod metalografickým mikroskopem	42
2.6.3	Pozorování intermetalické oblasti pod metalografickým mikroskopem.....	44
3	Závěr	47
	Bibliografie	49

Seznam obrázků

Obrázek 1: Alternativy pájecích slitin převzato z [4].....	14
Obrázek 2: Šablonový tisk.....	18
Obrázek 3: Teplotní profil RSS, převzato z [17]	20
Obrázek 4: Teplotní profil RTS, převzato z [17]	21
Obrázek 5: Schéma čtyřbodová metoda [21].....	22
Obrázek 6: Prototyp DPS.....	24
Obrázek 7: Návrh v software Eagle a finální DPS	25
Obrázek 8: Detail mezery mezi pady 0,1 mm.....	25
Obrázek 9: Vyhotovená DPS a nanesení pájecí pasty	26
Obrázek 10: Hodnoty pro nanesení pájecí pasty a kontrola nanesení pájecí pasty	26
Obrázek 11: 3D obrázek nanesení pájecí pasty.....	27
Obrázek 12: Pájecí pasta Sn42Ag1Bi57 NC273LT a preform Sn96,5Ag3Cu0,5	27
Obrázek 13: Osazovací automat a preformy	28
Obrázek 14: Nastavení teplotního profilu	28
Obrázek 15: Teplotní profily.....	29
Obrázek 16: Osazení DPS.....	30
Obrázek 17: Kontrola pájených spojů	30
Obrázek 18: Normy pro cyklování a nastavení časové prodlevy	31
Obrázek 19: Normy pro nastavení teplot.....	32
Obrázek 20: Graf měřeno před testováním	37
Obrázek 21: Graf měřeno po celém prvním cyklu stárnutí.....	37
Obrázek 22: Graf měřeno po renovaci DPS.....	38
Obrázek 23: Graf měřeno po celém cyklu stárnutí.....	38
Obrázek 24: Graf maximální hodnoty naměřených výsledků v průběhu měření	39
Obrázek 25: Graf minimální hodnoty naměřených výsledků v průběhu měření	39
Obrázek 26: Oblast pro mikrovýbrus	40
Obrázek 27: Vlevo vzorky připravené pro zalití směsí a vpravo vzorky připravené na pozorování	41
Obrázek 28: Dvoukotoučová bruska SAPHIR 530	41
Obrázek 29: Vzorek 1_2 1.V po celém cyklu stárnutí	42
Obrázek 30: Vzorek 1_2 1.V po celém cyklu stárnutí detail	42
Obrázek 31: Vzorek 3_2 1.V před cyklem stárnutí.....	42
Obrázek 32: Vzorek 3_2 1.V před cyklem stárnutí detail mezery	43
Obrázek 33: Vzorek 3_2 2.V po celém cyklu stárnutí	43
Obrázek 34: Vzorek 3_2 2.V po celém cyklu stárnutí detail mezery	43
Obrázek 35: Detail defektu u vzorku 3_2 1.V preforma 1	45
Obrázek 36: Měření úhlů u defektu (voidu).....	46
Obrázek 37: Intermetalická oblast a její chování	46

Seznam tabulek

Tabulka 1: Nejčastěji používané bezolovnaté pájky, přehled jejich tavení a využití [2]	13
Tabulka 2: Vlastnosti prvků ve vybraných příměsí v pájce [4] a [5]	14
Tabulka 3: Vlastnosti pájky SAC305 [8].....	15
Tabulka 4: Vlastnosti pájky SnBi [8]	16
Tabulka 5: Údaje z katalogového listu PF602-P30-T4	16
Tabulka 6: Údaje z katalogového listu SnAgBi NC273LT – AIM.....	17
Tabulka 7: Údaje z katalogového listu SAC3-XF3.....	17
Tabulka 8: Základní faktory pro živostnost pájeného spoje [14].....	19
Tabulka 9: Měření před stárnutím	32
Tabulka 10: Měření po týdnu v tepelné komoře při 90 °C	33
Tabulka 11: Měření po týdenním cyklování mezi teplotou 0 - 99,9 °C	33
Tabulka 12: Měření po týdnu v mrazícím boxu při -40 °C.....	33
Tabulka 13: Měření po úpravě DPS	34
Tabulka 14: Měření po týdnu v tepelné komoře při 90 °C po úpravě DPS	34
Tabulka 15: Měření po týdenním cyklování mezi teplotou 0 - 99,9 °C po úpravě DPS	34
Tabulka 16: Měření po týdnu v mrazáku při -40 °C po úpravě DPS.....	35
Tabulka 17: Měření po týdnu v tepelné komoře při 90 °C po úpravě DPS	35
Tabulka 18: Minimální hodnota výsledků všech naměřených hodnot	35
Tabulka 19: Maximální hodnota výsledků všech naměřených hodnot	36
Tabulka 20: Průměrná hodnota výsledků všech naměřených hodnot	36
Tabulka 21: Naměřené hodnoty intermetalické oblasti 1_2 2.V.....	44
Tabulka 22: Naměřené hodnoty intermetalické oblasti 3_2 1.V.....	44
Tabulka 23: Naměřené hodnoty intermetalické oblasti 3_2 2.V.....	45

Úvod

Bakalářská práce se zabývá studiem nízkoteplotních slitin a vliv environmentálních složek na danou DPS. Ke studiu jsou použity desky plošných spojů, které jsou osazené pomocí preforem.

Práce vznikla jako návaznost na semestrální práci, která byla realizována v předešlém roce. Bakalářská práce se zabývá testováním materiálové kombinace pájecí slitiny Sn96,5Ag3Cu0,5 (SAC) v preformách a nízkoteplotní pájecí pasty Sn42Ag1Bi57. Postupem času necháme vzorky stárnout v klimatických podmínkách. Celková náplň práce je zanalyzovat s co nejvíce naměřenými výsledky vliv environmentálních složek na zapájené preformy. Cílem je tak zjistit, jak se nám při měření budou měnit hodnoty, a v jakém rozsahu odporu se budeme pohybovat, včetně pozorování intermetalických oblastí.

V teoretické části máme rozepsané typy pájek, pájecích past a studium metody pájení přetavením. Součástí jsou také informace, které jsou nedílnou součástí pro správného navržení DPS a zároveň návrh použitého teplotního profilu.

V praktické části se zabýváme návrhem plošného spoje, vytvořením zkušební vzorku a následného testování pro zvolenou pájecí pastou SnAgBi a kvalitního teplotního profilu. Teplotní profil musí být zvolen tak, aby se nám pájecí pasta dokázala přetavit a zároveň nevytvořila žádný defekt. Po vytvoření zkušební vzorku jsme schopni nechat vzorek stárnout v klimatických podmínkách, a měřit pomocí čtyřbodové metody při konstantní teplotě 40 °C. Ve finále, se budou pozorovat délky intermetalických složek. Aby všechny tyto postupy byly srozumitelné, jsou určité kapitoly odkázány na části teoretickou, kde je metoda dopodrobna rozebrána.

Závěr je vyhodnocení a porovnání všech výsledků měření a pozorování.

1 Bezolovnaté pájení

1.1 Bezolovnaté pájky

Největší rozdíl mezi olovnatými pájkami a pájkami bezolovnatými je, že bezolovnaté pájky nejsou toxické a jejich nevýhodou je vyšší teplota tavení i některé horší vlastnosti (smáčivost, vzhled apod.). Pájky Sn/Pb při eutektické teplotě 183 °C dosahují tekutého stavu, zatímco u bezolovnatých pájek se rozmezí teplot pohybuje okolo 195-227 °C, v závislosti na jejich složení [1]. Příklad vybraných pájek a jejich teploty tavení jsou uvedeny v tab. 1 [2]. Při vyšší teplotě pro přetavení pájky se klade větší nárok na tepelnou odolnost použitých součástek a také více namáhají samotnou DPS (desku plošných spojů).

Tabulka 1: Nejčastěji používané bezolovnaté pájky, přehled jejich tavení a využití [2]

Oblast tavení [°C]	Pájka	Využití v průmyslu	Společnost
Slitiny s vysokým bodem tavení (>210°C)			
227	Sn/Cu	Spotřebitelský	Panasonic 3)
		Telekomunikace	Nortel
221	Sn/Ag 5)		
217	Sn/Ag/Cu	Automobilový	Panasonic 2)
		Telekomunikace	Nokia, Nortel, Panasonic, Toshiba
217	Sn/Ag/Cu/Sb 5)		
	Sn/In/Ag 5)		
	Sn/Ag/Cu/Zn 5)		
	Sn/Ag/Bi/Cu	Vojenský/letecký	Panasonic
	Sn/Ag/Bi/Cu/Ge	Spotřebitelský	Sony
Slitiny s bodem tavení v rozsahu 180 – 210 °C			
206 - 213	Sn/Ag/Bi/X	Spotřebitelský	Panasonic
206 – 213	Sn/Ag/Bi	Vojenský/letecký	Panasonic 1)
		Spotřebitelský	Hitachi
199	Sn/Zn	Spotřebitelský	NEC, Pan., Toshiba 4)
Slitiny s nízkým bodem tavení (<180°C)			
	Sn/Bi/Zn 5)		
138	Sn/Bi		Panasonic

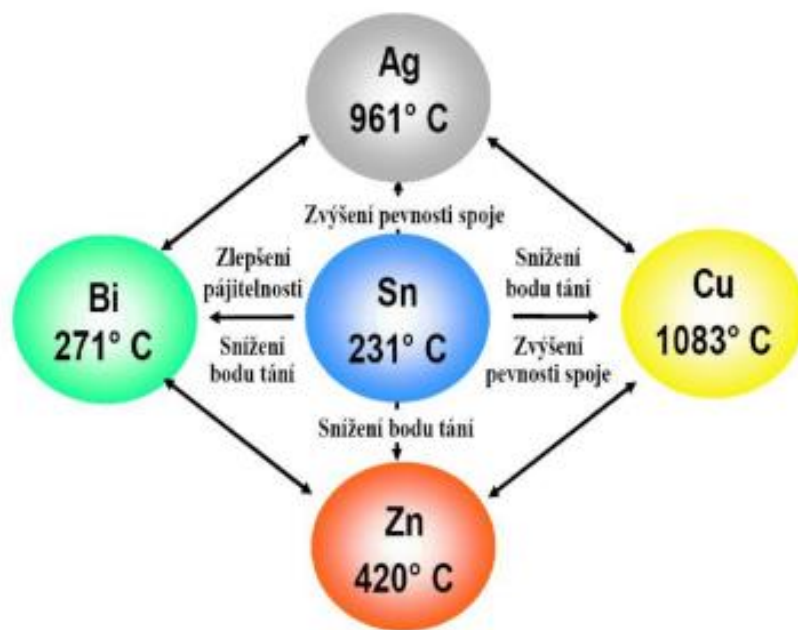
Poznámky k tabulce:

- 1) Je náchylná na kontaminaci Pb, které zhorší výrazně vlastnosti.
- 2) Sn95,5/Ag4/Cu0,5 – je nejstarší slitinou a není patentovatelná, není náchylná na kontaminace a proto se nejčastěji používá v jiném složení patentovanou slitinou pro pájky (např. Sn96,5/Ag3/Cu0,5 – bod tavení kolem 220 °C, je asi o 36 °C vyšší než u olovnatých pájek). Pro vysoký obsah stříbra je samozřejmě cena daleko vyšší. Vhodná je pro vlnu, přetavení i ruční pájení.
- 3) Je náchylná na kontaminace, zvyšuje se teplota tavení (Sn99,3/Cu0,7).
- 4) Sn91/Zn9 – je levná, ale kvůli obsahu Zn je náchylná na oxidaci a celkově k nečistotám (pájení v dusíku zřejmě nutné). Obsah Zn zhoršuje i smáčivost a zkracuje i skladovatelnost. Jeho bod tavení je nízký podobný jako u olovnatých pájek (199°C)
- 5) Nepříliš používané slitiny, kvůli jejich zkoumání pro jejich možné využití

1.2 Přehled nejčastějších druhů slitin bezolovnatých pájek

Nejčastěji se v elektrotechnice vyskytuje více druhů slitin bezolovnatých pájek. Nejčastěji se používají slitiny SAC (Sn-Ag-Cu), SC (Sn-Cu), SA (Sn-Ag). Slitina, která se jeví jako perspektivní se nazývá SCN_i (Sn-Cu-Ni), tato slitina se řadí pod slitiny SC, jelikož obsah niklu v pájce je minimální.

U bezolovnatých pájek se objevují i různé alternativy. Na obrázku 1 je ukázána kombinace prvků pájecích slitin. U uvedených prvků je znázorněna i jejich teplota tavení. Jednotlivé vlastnosti prvků a jejich vlivy jsou popsány v tabulce 1.2.



Obrázek 1: Alternativy pájecích slitin převzato z [4]

Tabulka 2: Vlastnosti prvků ve vybraných příměsí v pájce [4] a [5]

Příměs	Výhody	Nevýhody
Stříbro (Ag)	Snižuje bod tání Zlepšuje smáčivost Zlepšuje pevnost	Tvoří intermetalické sloučeniny způsobuje zrnitost a důlky v povrchu pájky
Bismut (Bi)	Snižuje bod tání Zlepšuje smáčivost	
Měď (Cu)	Zvyšuje pevnost	Zvyšuje teplotu tání Zvyšuje zrnitost Zvyšuje křehkost
Zinek (Zn)	Snižuje bod tání Nízká cena	Zhoršuje smáčivost Podporuje oxidaci
Antimon (Sb)	Zvyšuje pevnost Snižuje povrchové napětí	
Insium (In)	Snižuje bod tání	
Nikl (Ni)	Zabraňuje odsmáčení	Tvoří intermetalické sloučeniny
Germanium (Ge)	Zabraňuje oxidaci	

1.2.1 Preformy Sn96,5Ag3Cu0,5 (SAC)

Jedná se o slitiny pájky, které jsou slity do pevného stavu různých velikostí a slouží jako náhrada za součástky s odporem hodnoty 0Ω . Jsou nabízeny v různých velikostech a jsou v souladu s RoHS. Pro naše aplikace byla použita slitina pájecího materiálu je SAC305 - Sn96.5Ag3Cu0.5. V praxi se používají hlavně kvůli tomu, že není potřeba pájka či pájecí pasta, protože se preforma spojí s vodivými částmi.

Výhody

- Preformy mají velmi jednotný tvar, každý má přesně stejný objem pájecí slitiny
- K dispozici jsou různé velikosti a tvary
- Dají se aplikovat i bez přídavku tavidla

1.2.2 Pájka Sn/Ag/Cu (SAC)

Slitina se skládá z cínu, stříbra a mědi. Nejčastěji se objevuje pájka s označením SAC 305, obsahuje 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Eutektická teplota tavení SAC pájek se pohybuje v rozsahu 217 – 219 °C. Teplota je na rozdíl od pájek SC nižší o 10 °C, za tento pokles teploty tavení může příměs stříbra. Mechanická stabilita pájeného spoje se obecně zhoršuje při přibližování provozní teploty k bodu tání. Existuje více druhů pájek SAC, odlišují se podle poměrů jednotlivých složek. Poměry ve složkách SAC slitin se provádí, kvůli změnám mechanických vlastností, nikoli pro snížení teploty přetavení. V těchto pájkách vzniká intermetalická sloučenina, která má vliv na životnost pájeného spoje. Intermetalické sloučeniny, které je zastupují jsou: Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn a Ag_3Sn . Pro více informací ke slitinám můžete nalézt v literatuře [5] a [6].

Tabulka 3: Vlastnosti pájky SAC305 [8]

Pájka	Teplota	Hustota	Rezistivita	Pevnost
	Tavení			
	[°C]	[g/cm ³]	[$\mu\Omega$ m]	[MPa]
SAC305	217 - 219	7,37	0,15	52

1.2.3 Pájka Sn/Ag (SA)

Nejznámějším představitelem je Sn96,5Ag3,5 s bodem tání 221 °C. Je to sloučenina cínu a stříbra, kde dochází ke vzniku intermetalických sloučenin ve struktuře pájeného spoje => výsledná sloučenina je Ag_3Sn . Tato slitina se používá často v elektronice, díky její dostatečné pevnosti a smáčivosti. Slitina SnAg je odolná vůči zhrubnutí díky omezenosti rozpustnosti stříbra v cínu. Také se používají povrchové úpravy NiAu, pro zpomalení difúzního růstu. Povlak Ni a Au slouží jako difúzní bariéra k omezení pronikání mědi do pájky a vytváření intermetalické vrstvy Cu_6Sn_5 . Pro více informací ke slitinám se nachází v literatuře [5] a [6].

1.2.4 Pájka SnBi (SB)

Slitina se skládá z cínu a bismutu. Nejvyskytovanějším typem této slitiny je pájka Sn42Bi58 s bodem tání 137 °C. Tato slitina se nejvíce využívá pro nízkoteplotní aplikace, jedná se o náhradu za olovnatou slitinu Sn/Pb, kvůli celosvětovému zájmu o zrušení používání olova. Více v literatuře [5] a [6].

Další typ je Sn42Ag1Bi57 (Sn/Ag/Bi), kde se jeho teplota tání pohybuje okolo 137 °C. Je to pájecí slitina, která obsahuje navíc ještě stříbro pro lepší smáčivost pájky. Velmi dobře odolává tepelnému namáhání. Více naleznete v literatuře [5], [7] a [8].

Tabulka 4: *Vlastnosti pájky SnBi [8]*

Pájka	Teplota Tavení	Hustota	Rezistivita	Pevnost
	[°C]	[g/cm ³]	[μΩm]	[MPa]
SnBi	137	7,65	0,17	44

1.3 Typy pájecí pasty

1.3.1 Pájecí pasta SnBi - PF602-P30-T4

Tato pasta je od firmy Nevo. Jedná se o bezolovnatou nízkoteplotní pájecí pastu. Široké využití má pro pájení tepelně citlivých součástek, díky své teplotě tání, která je už od 139 °C. Pasta se skládá ze 42% cínu (Sn) a 58% bismutu (Bi). Jedná se o nejvhodnější pastu pro tisk přes šablonu. Výdrž pasty na šabloně se udává cca 8 hodin, aniž by došlo k degradačním účinkům. V tabulce 5, jsou popsány nejdůležitější údaje z katalogového listu. [10] a [11]

Tabulka 5: *Údaje z katalogového listu PF602-P30-T4*

Údaje z katalogového listu	
Vrcholová teplota přetavení	165 – 185 °C
Nad 138 °C	30 – 100 s
Předehřev	90 – 120 °C
Doba přetavení	30 – 120 s

1.3.2 Pájecí pasta SnAgBi - NC273LT

Jde o bezolovnatou pájecí pastu, která je slitinou cínu, stříbra a bismutu. Celkové složení se skládá z cínu (Sn) 42 %, stříbra (Ag) 1 %, Bismut (Bi) 57 %. Tato pasta se dá skvěle využít pro nízkoteplotní aplikace, její teplota tání se pohybuje okolo 137 °C. Výhodou této pasty je šetrnější proces teplotnímu namáhání pouzder či šetření energie při výhřevu přetavovací pece. Nevýhodou této pasty je její křehkost. [12]

Tabulka 6: Údaje z katalogového listu SnAgBi NC273LT – AIM

Údaje z katalogového listu	
Vrcholová teplota přetavení	160 - 180 °C
Nad 137 °C	40 – 60 s
Přehřev	50 – 100 °C
Doba přetavení	30 – 120 s

1.3.3 Pájecí pasta SAC3-XF3

Bezolovnatá pájecí pasta, která je založena na bázi syntetické pryskyřice. Skládá se ze slitin cínu (Sn) 96,5 %, stříbra (Ag) 3 % a mědi (Cu) 0,5 %. Pasta se využívá hlavně pro dlouhé pájecí profily, díky to, že má vysokou tepelnou stabilitu. Opět se využívá pro tisk přes šablonu a díky tomu, že má jemný zrnitý prášek (25 – 45 μm), se využívá pro tisk jemných součástí např. čipy integrovaných obvodů. Teplota tavení této pasty se pohybuje okolo 217 °C. Teploty pro kvalitní pájení by se měli pohybovat v rozsahu 235 – 250 °C. Pokud se teplota bude pohybovat níže, nemusí dojít ke správnému přetavení a naopak při vyšší teplotě hrozí, že může dojít k odsmáčení. Při obou případech nebude spoj kvalitně zapájený. [13]

Tabulka 7: Údaje z katalogového listu SAC3-XF3

Údaje z katalogového listu	
Vrcholová teplota přetavení	235 – 250 °C
Nad 217 °C	30 – 50 s
Přehřev	155 – 175 °C nebo 175 – 195 °C
Doba přetavení	45 – 100 s

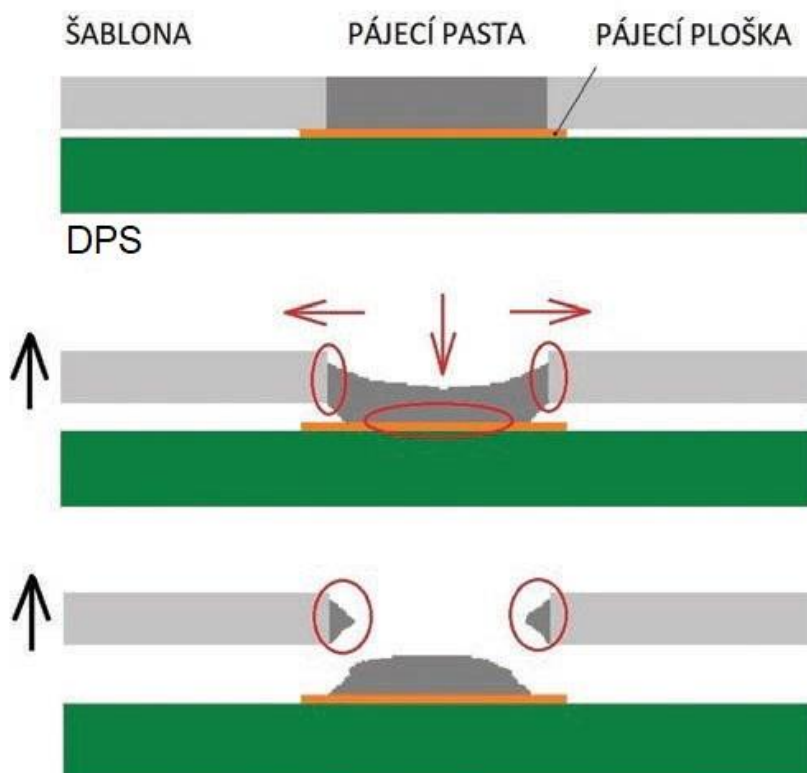
1.4 Pájení pájecích past

Princip je založen na tom, že se na pájené místo nanese pájecí pasta a působením tepelné energie dochází k přetavení pasty. Pájecí pasta, její nanášení a pájení jsou jak prostorově tak i časově odděleny. Pájecí pasta se může nanášet více způsoby[2], [14], [15]:

- Tiskem přes šablonu – šablonovým tiskem
- Tiskem přes síto – sítotiskem
- Dávkováním – dispenzerem

Přičemž každá metoda může být realizována:

- Ručně
- Poloautomaticky
- Automaticky



Obrázek 2: Šablonový tisk

Těmito způsoby nanášíme pastu pouze na místa, kde je zapotřebí. V praxi to tedy znamená úsporu materiálu. Po nanesení pasty existují 3 různé způsoby dodání tepelné energie:

- Vedení (kondukce) – Teplo se převádí při kontaktu dvou látek s rozdílnou teplotou. Příklad je DPS a pájecí hrot. Využití je nejčastěji při lokálním pájení.
- Proudění (konvekce) – Při přenosu tepla prouděním nastává u kapalin nebo u plynu (např. vzduch, dusík), kde se míchá teplejší část s chladnější částí kapaliny nebo plynu. Proudění se rozděluje na přirozené a nucené. Kde u přirozeného proudění je zapříčiněno změnou hustoty, na kterou má dopad právě změna teploty. Zatímco nucené proudění je uměle vytvořeno, za účelem přenosu většího množství tepla. Tento jev se dá uměle vyvolat mechanickými prostředky, např. ventilátory.
- Záření (radiace) – Těleso vyzařující elektromagnetické vlny na pájecí pastu, která vlnění pohlcuje => zvyšování vnitřní energie a ohřev pájecí pasty.

1.5 Teplotní profil

Optimální teplotní profil, kde máme závislost průběhu teploty na čase, prochází jistým vývojem. Optimální teplotní profil nám zajistí maximální jakost a životnost pájeného spoje. Čtyři základní faktory působí na životnost spoje popsané v tabulce 8.

Tabulka 8: Základní faktory pro životnost pájeného spoje [14]

Teplotní profil	Rychlost předehřevu
	Teplota nad liquidem
	Prodleva nad liquidem
	Rychlost chlazení
Geometrie pájecích ploch	Tvar
	Velikost
	Umístění na substrátu
Materiál pájecích ploch	Smáčivost
	Složení
	Povrchová úprava
Pájecí pasta	Složení
	Agresivita tavidla
	Pájka

1.6 Rozdělení teplotních profilů

Jedná se o grafické znázornění závislosti teploty během procesu pájení v čase. Nastavení teploty je nezbytnou částí pro správný výstup pájeného spoje. Je to dané nastavením pece, tak aby k přetavení pasty a následné vytvoření pájeného spoje, bylo co nejkvalitnější. Při špatném nastavení teplotního profilu, nám může zapříčinit defekt při výsledném pájení. Tyto profily se rozdělují na 2 druhy, podélný a příčný.

1.6.1 Příčný teplotní profil

Při tomto teplotním profilu, je dán hlavně ze jména konstrukce pece, uživatel ho nemůže nějak záměrně ovlivnit. Ovlivnit se dá pouze velikostí hustoty pájených součástek na DPS. Příčný teplotní profil zobrazuje nehomogenitu přetavovacího tunelu v příčném směru během přetavovacího procesu. V tomto profilu se rozdíl teplot u přetavovacích pecí pohybuje v rozmezí $\pm 2^\circ\text{C}$.

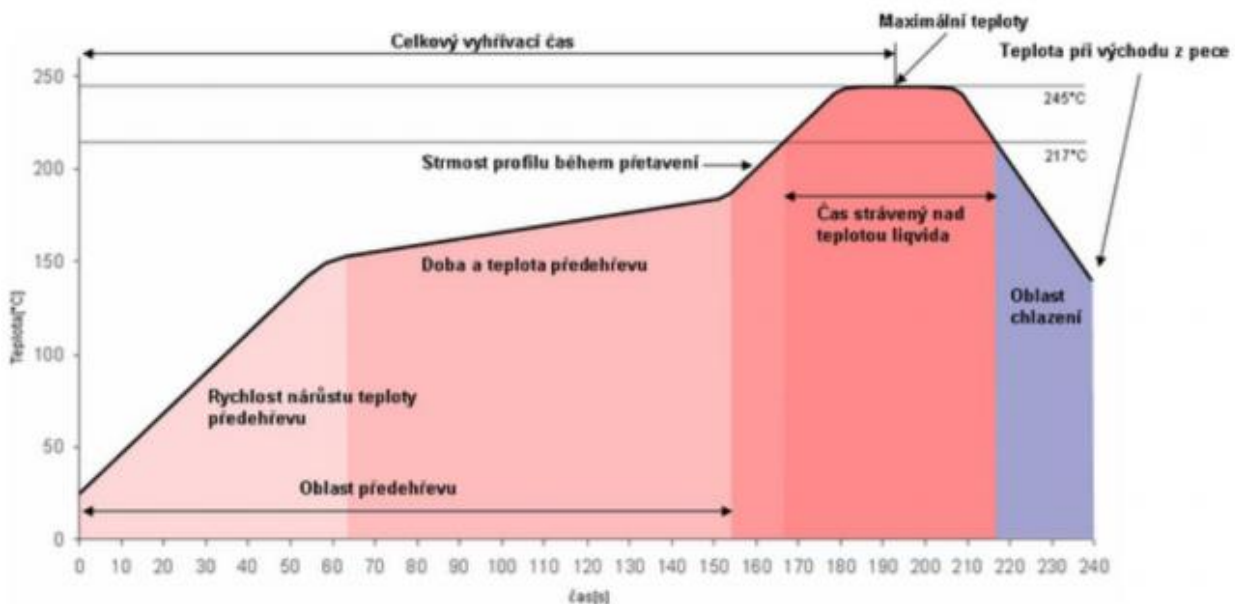
1.6.2 Podélný teplotní profil

Rozděluje se na základní 2 typy:

- 1) Sedlový profil – RSS (Ramp Soak Spike)
- 2) Lineární profil – RTS (Ramp To Spike)

1.6.3 RSS (Ramp Soak Spike)

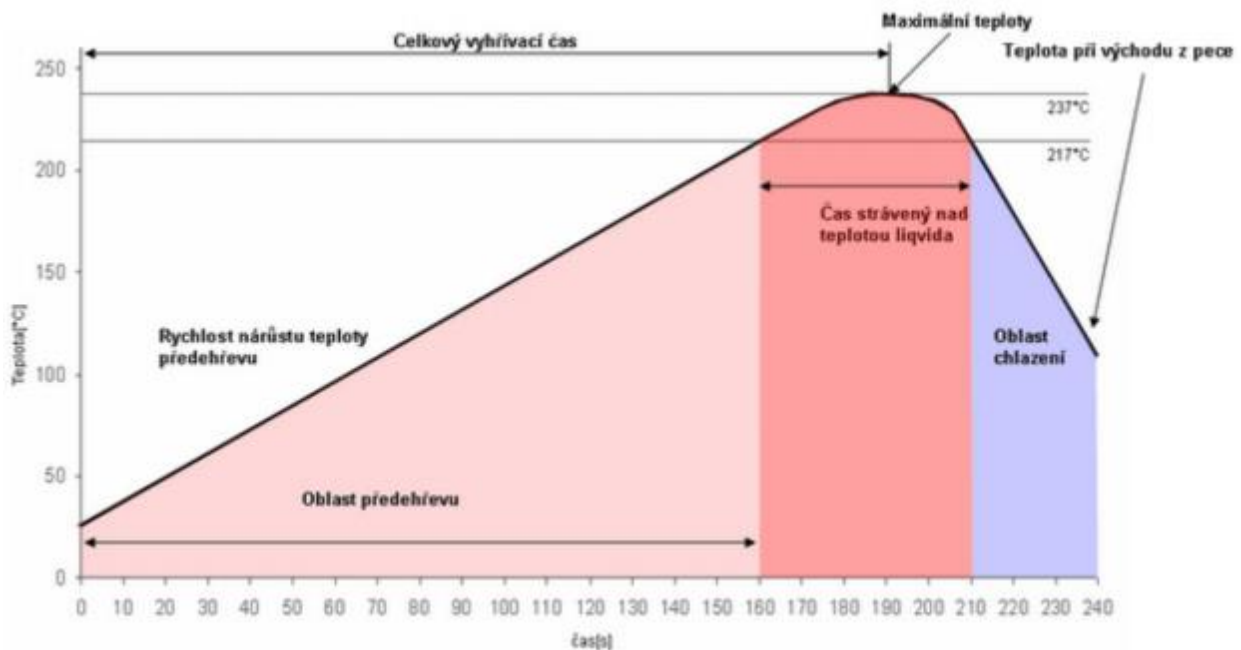
Jde o sedlový profil. Skládá se ze čtyř částí, které jsou uvedeny v 1.6.5. Z obrázku č. 3 můžeme vidět jednotlivé části a jejich teplotu v závislosti na čase. V první části jde o předehřev, kde se teplota postupně zvyšuje => pak následuje fáze vyrovnání kde se teplota pomalu ustálí => předposlední fází je fáze přetavení, kde se teplota dostane na teplotu přetavení => poslední fází je fáze chlazení, kde teplota pomalu klesá. [18]



Obrázek 3: Teplotní profil RSS, převzato z [17]

1.6.4 RTS (Ramp To Spike)

Jde o lineární profil. U tohoto profilu chybí vyrovnávací fáze, kde teplota roste oproti sedlovému profilu lineárně až do maximální teploty. Teplota roste pomaleji než u RSS, aby se tak zamezilo teplotnímu šoku a nerovnoměrnému ohřátí součástek. Teplotní profil je zobrazen na obrázku č. 4. [18]



Obrázek 4 : Teplotní profil RTS, převzato z [17]

1.6.5 Fáze u teplotního profilu

Samotný profil se nám dále dělí na [17] [18]:

Fáze předehřívání – kde dochází k postupnému ohřívání pájených součástek a DPS. Tato fáze je časově náročná, kvůli redukování teplotního šoku, který nám zmenšuje pravděpodobnost poškození součástek či samotné desky.

Fáze vyrovnávací (pouze u RSS) – Při této fázi se teplota pece ustálí přibližně na stejnou teplotu, aby se mohly všechny součástky zahřát. Důvodem je to, že se každá součástka zahřívá jinak. V této fázi se pomalu začínají aktivovat tavidla.

Fáze přetavení – V této fázi je díky maximální dovolené teplotě pájecí pasta v tekutém stavu. Tato fáze nesmí být moc dlouhá kvůli ohrožení poškození součástek.

Fáze chlazení – Jedná se o poslední fázi, kde se chladí celá deska, ideální rychlost chlazení se pohybuje okolo 4 – 5 °C/s.

1.7 Tavidla v pájecí pastě

Nedílnou součástí pájení jsou tavidla, která působením tepla pomáhají odstranit z povrchu pájeného materiálu oxidy, nečistoty a zároveň jej chrání proti oxidaci během procesu. Navíc také při zahřátí podporují zrychlení smáčivosti pájených materiálů pájkou. V praxi se tavidla vyskytují v tekutém stavu při pájení vlnou, nebo mohou být součástí pájecí pasty. [2][4]

Funkce tavidla:

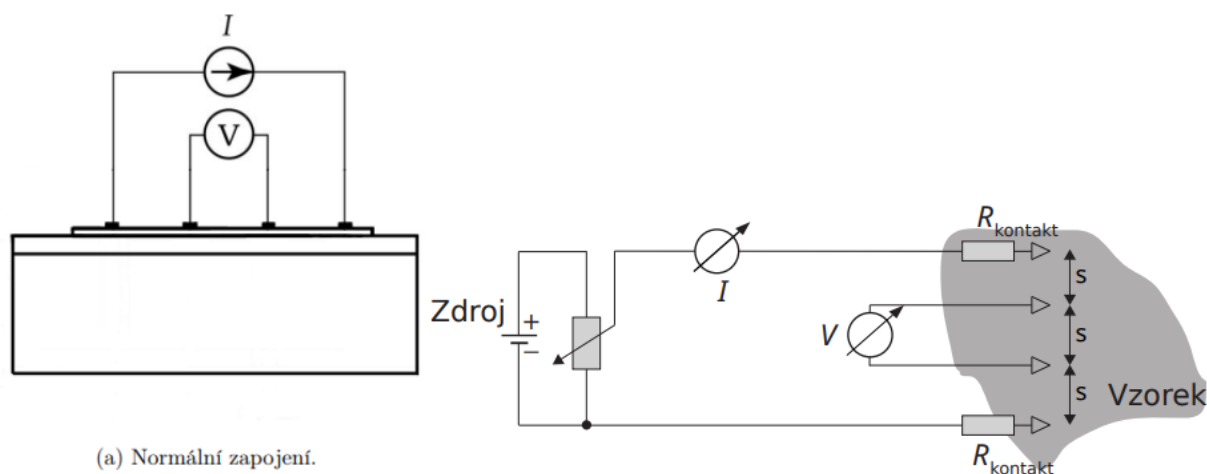
- Odstranění povrchových oxidů a jiných nečistot z pájeného povrchu či přímo z pájky.
- Zlepšení přenosu tepla od zdroje k pájenému místu.
- Fyzicky i chemicky za působení tepla napomáhá k vytvoření spolehlivého pájeného spoje.
- Snižování povrchového napětí pájecí slitiny zapříčiní, že se pájka dobře rozteče.
- Řídí tixotropní a reologické vlastnosti.

Při použití tavidla se musíme také zajímat o jeho následné čištění, protože zbytky tavidla mají špatný vliv na pájený spoj zejména z důvodů:

- Snižování živostnosti a spolehlivosti pájeného spoje
- Zhoršuje elektrické vlastnosti
- Omezuje elektrické testování
- Místy mohou způsobit i korozi

1.8 Čtyřbodová metoda

Jedná se o zapojení čtyř sond do obvodu, při němž jeden okruh měření je proudový a druhý okruh napěťový. Kontakty jsou v symetrickém geometrickém uspořádání, proud I teče do vzorku z jednoho z vnějších kontaktů (zdroj), přes všechny propojené cesty ve vzorku až na konec cest (odtok). Mezi tyto kontakty je měřeno napětí V . Abychom zaručili měrný odpor vzorku co nejpřesněji, měly by být odděleny kontakty pro měření napětí a kontakty pro měření proudu. Závislost I na V nám představuje voltampérovou charakteristiku, která nám umožňuje určit odpor [21].



Obrázek 5: Schéma čtyřbodová metoda [21]

1.9 Stárnutí a enviromentální vlivy

1.9.1 Klimatické komory

Dělení klimatických komor, může být dle jejich primárního klimatického určení, často se ale stává, že kombinují více klimatických parametrů zároveň. Další možnosti dělení je podle velikosti komory, neboli objem zkušebního prostoru.

1.9.2 Tepelná komora

V této komoře dokážeme nastavovat danou teplotu na určitou dobu. Typický rozsah u těchto komor se pohybuje od -80 °C až 200 °C. Pro naše zkoumání byla použita tepelná komora s rozsahem 0 °C – 100 °C, pro dosažení teploty mrazu byl použit mrazící box.

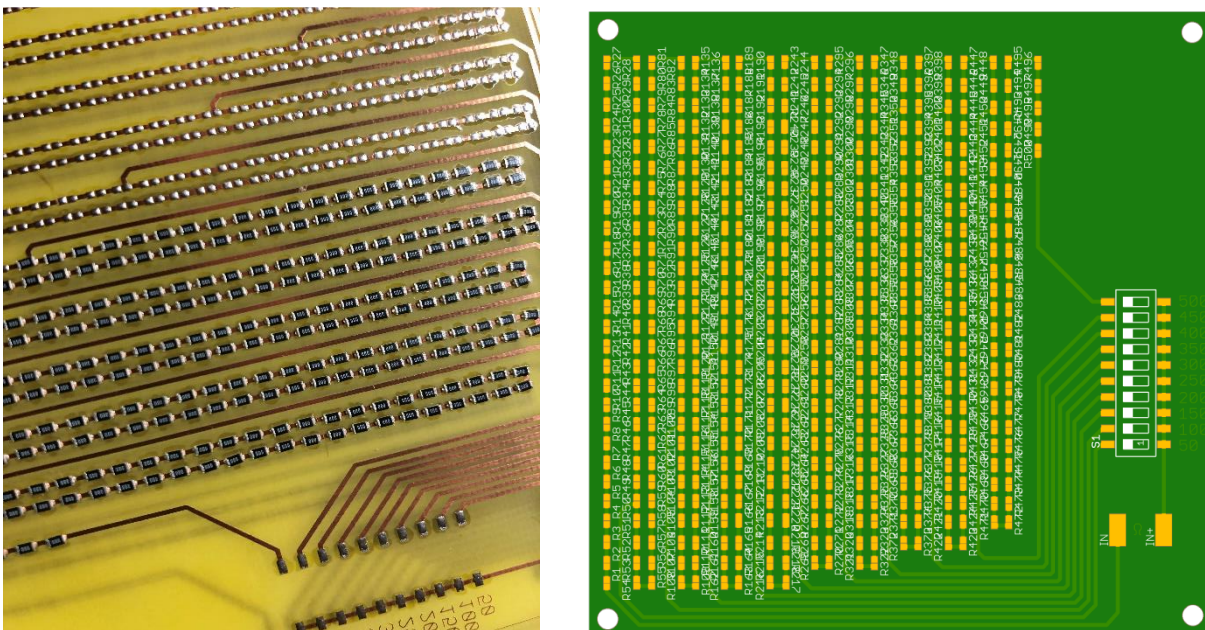
1.9.3 Šoková teplotní komora

V těchto komorách nám umožňuje aplikovat na testované vzorky teplotní šok, v praxi to znamená významná změna teploty v krátkém čase. Nastavení komory funguje tak, že stanovíme nejnižší a nejvyšší teplotu, dobu trvání na nejvyšší či nejnižší teplotě a na konec nárůst a pokles teploty[°C]/minuta.

2 Praktická část

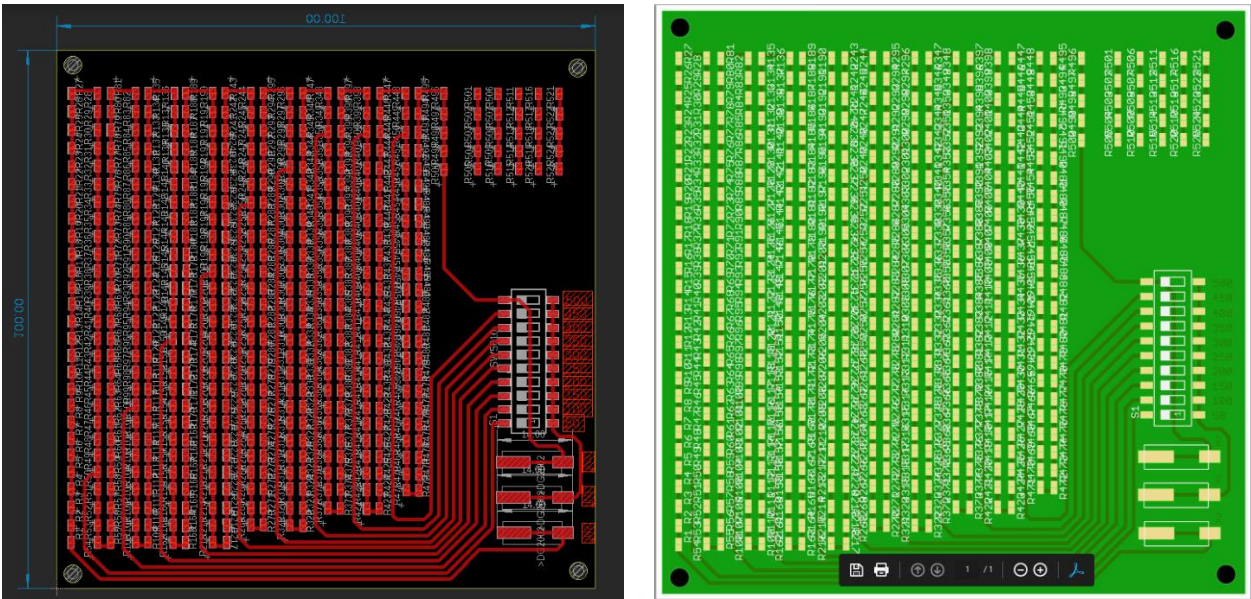
2.1 Prototyp DPS

V rámci semestrální práce, byl vytvořen prototyp DPS pro testování bezolovnaté pájecí pasty. Podle této DPS jsem se snažil navrhnout vhodný plošný spoj, pro naše účely. Jednalo se o to udělat návrh 500 kusů součástek/preforem, vývodů pro měření ale i návrh pro zjednodušení celkového měření odporu, pomocí čtyřbodové metody. V podstatě šlo o odpory zapojené v sérii. Na dalším obrázku č. 6 můžete vidět počáteční návrh DPS.



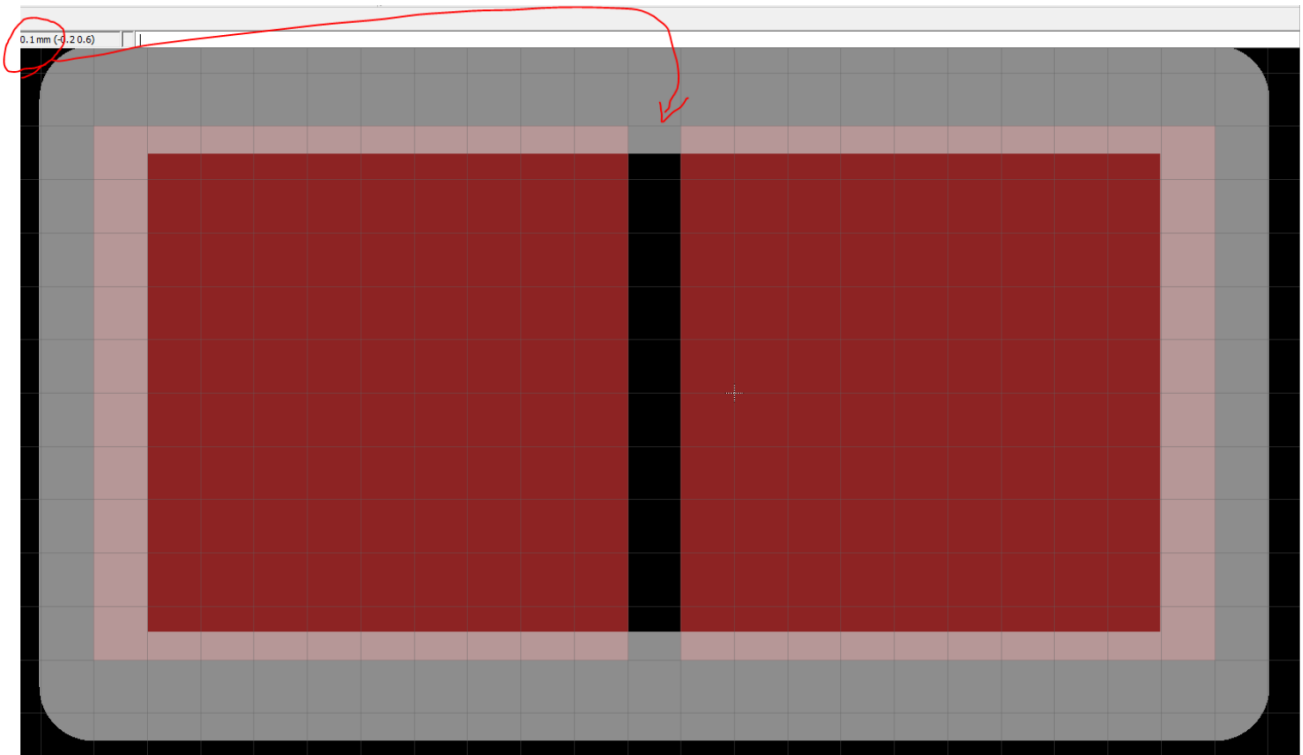
Obrázek 6: Prototyp DPS

Kontakty byly rozděleny do sekcí po 50 kusech, kde každá další sekce vzrostla o dalších 50 kusů. V praxi to vypadalo tak, že v sekci 1 bylo 1-50 ks, sekci 2 1-100 ks, sekci 3 1-150, sekci 4 1-200, sekci 5 1-250, sekci 6 1-300, sekci 7 1-350, sekci 8 1-400, sekci 9 1-450 a sekci 10 1-500. Tímto rozdělením jsem chtěl měřit jednotlivé části DPS a porovnávat naměřené hodnoty mezi určitým počtem kontaktů pomocí čtyřbodové metody.



Obrázek 7: Návrh v software Eagle a finální DPS

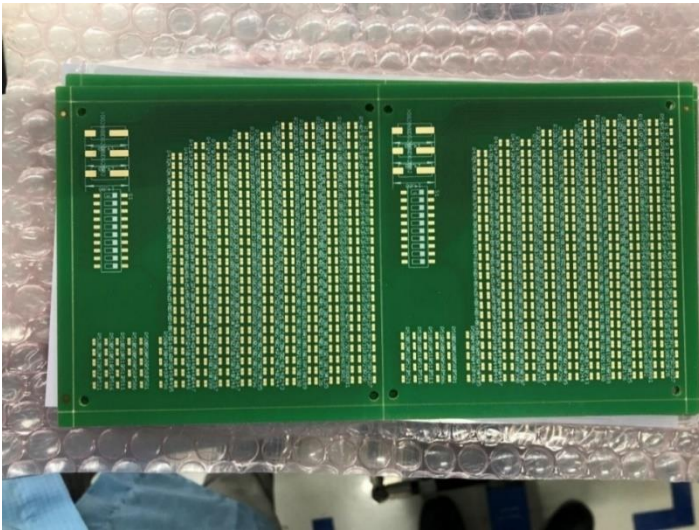
Na začátku jsme navrhovali, že by cesty mohly být propojeny pouze pájkou ale když přišlo na testování, tak jsme zjistili, že pro naše účely budeme nuceni použít preformy. Na obrázku č. 8 můžete vidět přesně navrhovanou mezeru mezi pady, která činí 0,1 mm. I navzdory takové malé mezeře se nám pájku nepodařilo spojit, proto se v prototypu vyzkoušelo zapojení odporů s hodnotou 0 Ω.



Obrázek 8: Detail mezery mezi pady 0,1 mm

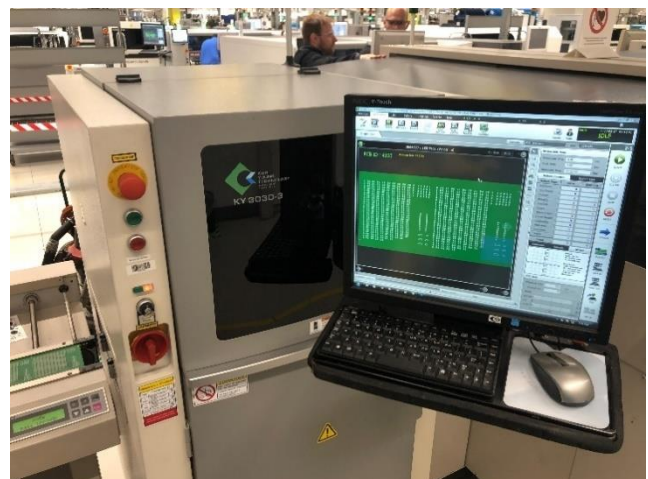
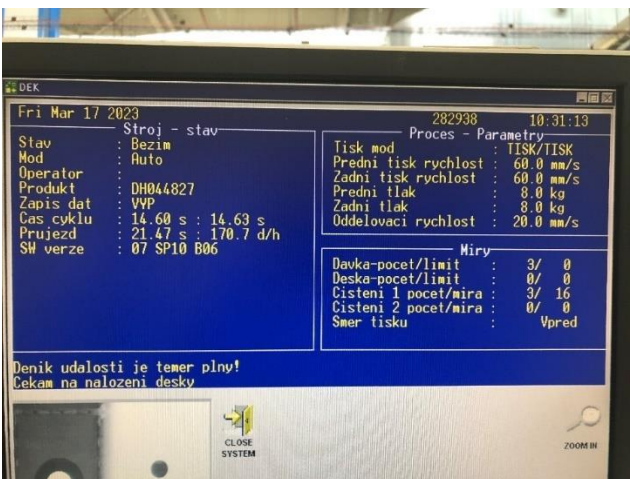
2.2 Výroba DPS

Deska byla vyrobena ve firmě PCB Gatema, dle požadavků a zasláního schématu, viz. obrázek č. 9. Pro výrobu byl použit základní materiál FR-4 (Tg135), základní vnější Cu 35 μm , minimální šířka izolační mezery 150 μm , rozměry jednoho kusu 100 x 100 mm jednostranná DPS. K povrchové úpravě bylo použito imerzní zlato s podkladem chemického niklu. Požadovaná šířka izolační mezery 100 μm z konstrukčních důvodů nemohla být dodržena, proto se upravila na 150 μm .



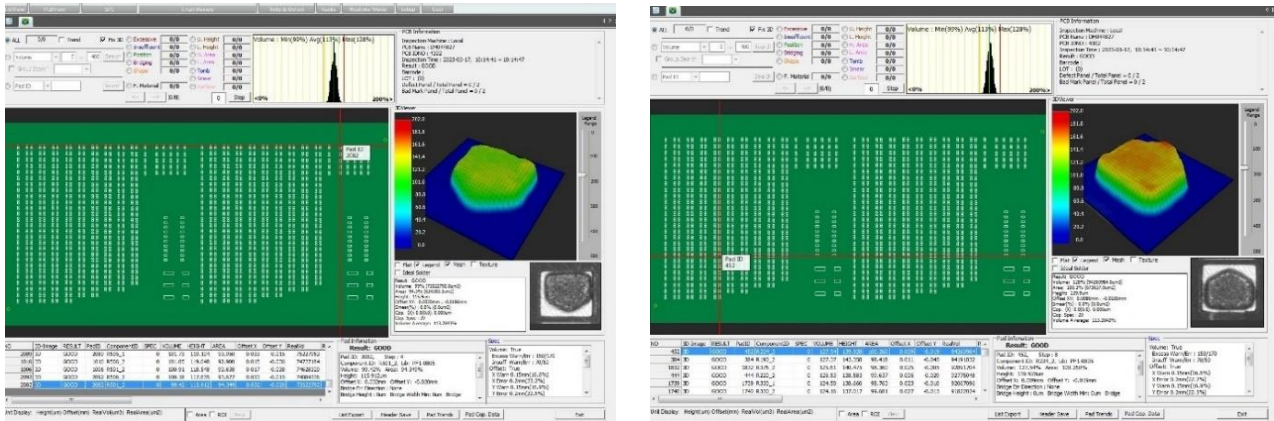
Obrázek 9: Vyhotovená DPS a nanesení pájecí pasty

2.3 Tisk pájecí pasty, osazení a přetavení



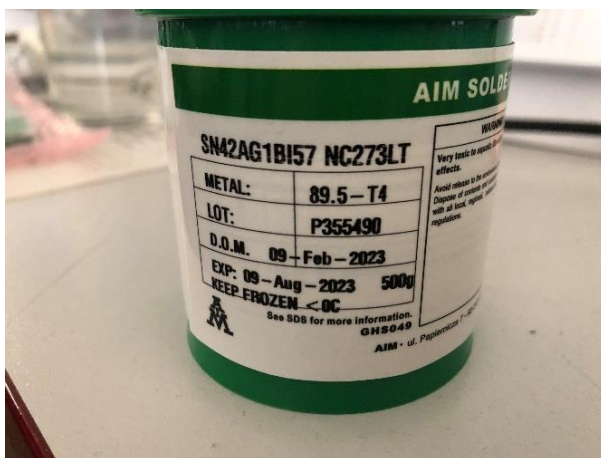
Obrázek 10: Hodnoty pro nanesení pájecí pasty a kontrola nanesení pájecí pasty

Nanesení pájecí pasty, bylo automaticky pomocí automatického šablonového tisku MPM Momentum. Po nanesení pájecí pasty se DPS dala na 3D kontrolu. Tato kontrola proběhla v zařízení KY 3030-3, kde nám jako finální soubor program ukázal 3D nanesení pasty nejmenší a největší volume viz. obrázek číslo 11. Rozptyl pájecí pasty se pohyboval od 99,42 % do 127,54 %.



Obrázek 11: 3D obrázek nanesení pájecí pasty

Pájecí pastu pro naše účely jsme si vybrali Sn42Ag1Bi57 viz. obrázek č. 12, která je popsána v teoretické části. Osazení preforem pájecí slitiny SAC305 proběhlo pomocí osazovacího automatu od firmy ASMPT SMT obrázek 13. Automatické osazení bylo pouze pro preformy, zbylé součástky jsme si před pecí osadili ručně obrázek 16. Pro testování jsme si připravili 3 desky, které jsme nechali zapájet třemi způsoby v peci Heller 1812 Air EXL Reflow Oven. 1. deska na nejnižší teplotu přetavení 158 °C, 2. deska na nejvyšší teplotu přetavení 185 °C a 3. deska byla taktéž nastavena na nejvyšší teplotu přetavení a po prvním přetavení byla znovu na stejný profil poslána do pece. Nastavení pece můžeme vidět na obrázku číslo 14. Vše probíhalo ve firmě RESIDEO- Honeywell, za pomoci odborného a technického dohledu. Vyhodnocení pájení preforem vyhovují normě IPC-A-610 jak z hlediska osazení (stranový, délkový přesah i pootočení), tak i z pohledu pájení – smáčení preforem vyhovující s odpovídajícím smočením pájky po čelních stěnách preforem.

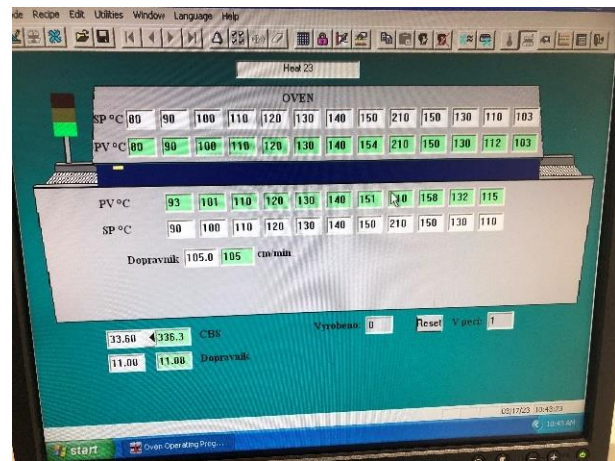


Obrázek 12: Pájecí pasta Sn42Ag1Bi57 NC273LT a preform Sn96,5Ag3Cu0,5



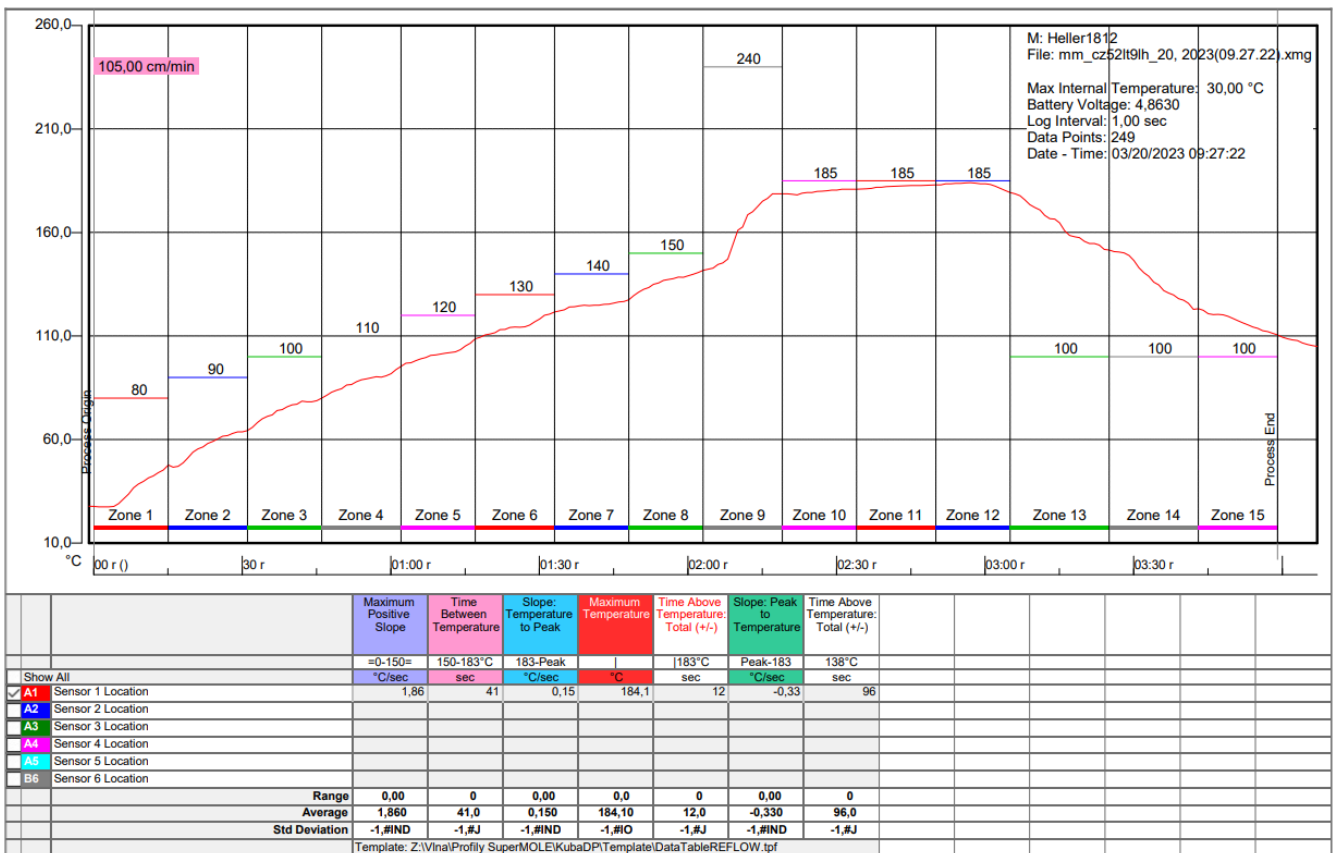
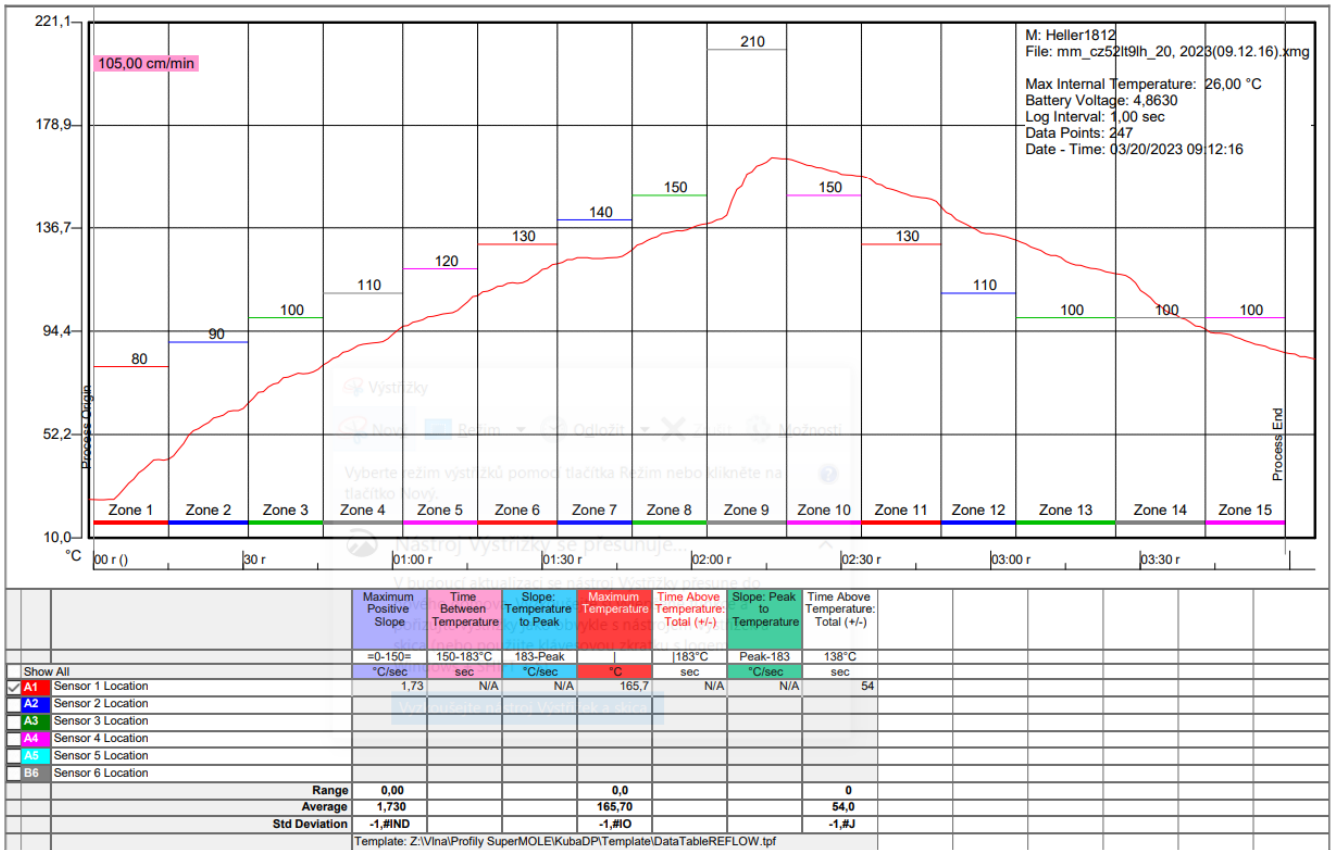
Obrázek 13: Osazovací automat a preformy

Na obrázku 13 vpravo, můžeme vidět, že preformy jsou v páse uspořádány nepravidelně z hlediska rovné a oblé plochy, což se ve výsledku projeví na osazení DPS viz obrázek 17.

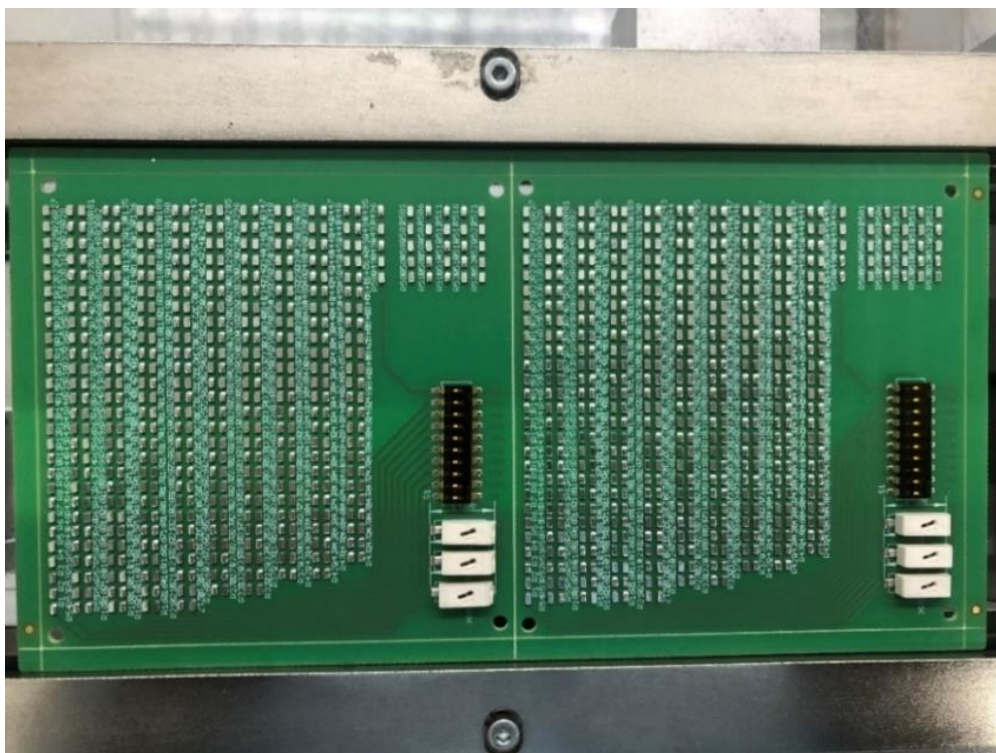


Obrázek 14: Nastavení teplotního profilu

V následujícím obrázku 15, vidíme graficky znázorněný teplotní profil. Pec je rozdělena na 15 zón, při čemž v prvním teplotním profilu byla teplota přetavení nastavena na 158 °C a ve druhém teplotním profilu byla nastavena teplota přetavení na 185 °C.

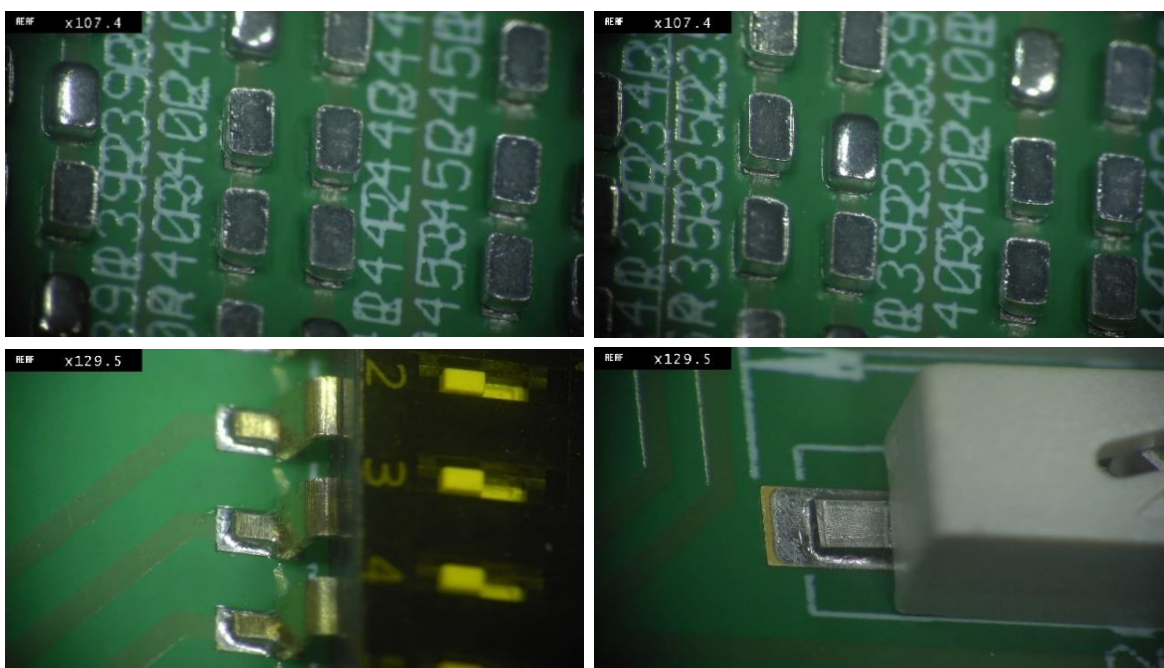


Obrázek 15: Teplotní profily



Obrázek 16: Osazení DPS

Kontrolu pájených spojů, jsme udělali pomocí mikroskopu, kterou můžeme vidět na obrázku číslo 17. Vidíme zde, že spoje na DPS s nejnižším převratovacím profilem, kontaktní plocha, kde došlo ke sloučení preformy s pájecí pastou je výrazně menší z důvodu horšího smočení preformy.



Obrázek 17: Kontrola pájených spojů

2.4 Stárnutí v klimatických podmínkách

Po vyhotovení vzorků jsem začal DPS testovat. Stárnutí probíhalo v tepelné komoře FRIOCELL 66R, kde se testovalo týden při 90 °C (90 °C jsem zvolil jako 2/3 z teploty tavení). Po stárnutí teplem jsem nastavil komoru na cyklování mezi teplotou 0 – 99,9 °C, kde na 99,9 °C a na 0 °C byla 60 minut prodleva a nechal cyklovat. Po cyklování jsem vzorky dal na stárnutí do mrazáku při -40 °C/týden. Mezi jednotlivými zkouškami jsem prováděl měření, které probíhalo čtyřbodovou metodou při 40 °C, pomocí zařízení Keysight 34401A a pozoroval jak se stárnutím mění odpor. Výsledky jsem zpracoval do přehledných tabulek a vytvořil průměrnou, nejmenší a nejvyšší hodnotu odporu. Testování bylo provedeno v souladu s normy IPC-9701A a JESD22-A104C, které můžeme vidět na obrázku 18 a 19.

February 2006

IPC-9701A

Table A-1 Values for Exponent "m" for the Four Test Condition Levels and for Four Representative Product Use Conditions

Test	Test Condition			m	Typical Product Cycles			m
	ΔT	T(min)	T(max)		ΔT	T(min)	T(max)	
TC 1	100°C [180°F]	0°C [32°F]	+100°C [212°F]	2.444	20°C [36°F]	+20°C [68°F]	+40°C [104°F]	2.210
TC 2	125°C [225°F]	-25°C [-13°F]	+100°C [212°F]	2.490	60°C [108°F]	0°C [32°F]	+60°C [140°F]	2.210
TC 3	165°C [297°F]	-40°C [-40°F]	+125°C [257°F]	2.471	100°C [180°F]	-20°C [-4°F]	+80°C [176°F]	2.210
TC 4	180°C [324°F]	-55°C [-67°F]	+125°C [257°F]	2.499	140°C [252°F]	-40°C [-40°F]	+100°C [212°F]	2.210

Table A-2 Mean Fatigue Lives for a Given Component Assembly for the Four Test Condition Levels and for Four Representative Product Use Conditions, and Their Respective Acceleration Factors

Test	Test Condition		ΔT	Typical Product Cycles		
	ΔT	N _f (50%) N _f (1%)		ΔT	N _f (50%) N _f (1%)	AF(N)
TC1	100°C [180°F]	17,100 5,910	20°C [36°F]	221,000 76,700	12.9	310.2
TC2	125°C [225°F]	11,900 4,140	60°C [108°F]	19,500 6,770	1.63	39.2
TC3	165°C [297°F]	5,570 1,930	100°C [180°F]	6,300 2,190	1.13	27.2
TC4	180°C [324°F]	4,980 1,730	140°C [252°F]	3,000 1,040	0.80	14.4

b) Condition D30+ (30 minutes or higher dwell) – This condition requires dwells of 30 minutes and higher (60 minutes) at the hot/cold temperature extremes in order to experimentally induce creep damage that may be somewhat comparable to lead-based solder. Modeling in conjunction with experimental data at different dwell times may be required to better define such a comparison.

For bismuth-tin (Bi-Sn) based solder alloys (e.g., 57Bi-42Sn-1Ag), the 0 - 100°C temperature cycle should be required, unless components plated with Sn-Pb solder are used. In this case, a -25 to +75°C temperature cycle is recommended. Cycle profiles other than these should not be considered acceptable for this class of Pb-free solders.

Obrázek 18: Normy pro cyklování a nastavení časové prodlevy

Obrázek číslo 18, nám stanovuje normu, podle které je potřeba nastavit cyklování. Jedná se o dobu prodlevy na nejnižší a nejvyšší hodnotě. V praxi to znamená, že při nastavení teplot 0 – 100 °C, nastavíme minimální časovou prodlevu pro 0 °C a 100 °C 30 minut.

Table 1 — Temperature cycling test conditions

Test Condition*	Nominal Ts(min)(°C) with Tolerances	Nominal Ts(max)(°C) with Tolerances
A	-55(+0, -10)	+85(+10, -0)
B	-55(+0, -10)	+125(+15, -0)
C	-65(+0, -10)	+150(+15, -0)
G	-40(+0, -10)	+125(+15, -0)
H	-55(+0, -10)	+150(+15, -0)
I	-40(+0, -10)	+115(+15, -0)
J	-0(+0, -10)	+100(+15, -0)
K	-0(+0, -10)	+125(+15, -0)
L	-55(+0, -10)	+110(+15, -0)
M	-40(+0, -10)	+150(+15, -0)
N	-40(+0, -10)	+85(+10, -0)

*CAUTION: Care should be taken when selecting Test Conditions, since: 1) the Ts(max) requirement for a specific Test Condition may exceed the glass transition temperature of some package materials which may induce failure mechanisms not normally seen during design application conditions in the field, and 2) CTE differences over the test condition temperature range can produce premature failure of plated through holes in the test board, thus limiting electrical readout capability for the parts on test. Test Conditions that exceed 125 °C for Ts(max) are not recommended to Pb/Sn solder compositions.

NOTE Temperature cycling test conditions different from Table 1 can be used. However, test conditions should meet the soak, cycles per hour and ramp rate recommendations for the failure mechanism being tested. These conditions must be documented as indicated in Section 7(f).

Table 2 — Soak mode conditions

Soak Mode	Minimum Soak Time at Soak Temperature(max) & Soak Temperature(min) (minutes)
1	1
2	5
3	10
4	15

NOTE Soak Modes different from Table 2 can be used, however, test conditions should be appropriate for the failure mechanism being tested. These conditions must be documented as indicated in Section 7(f).

Test Method A104C
(Revision of Test Method A104-B)

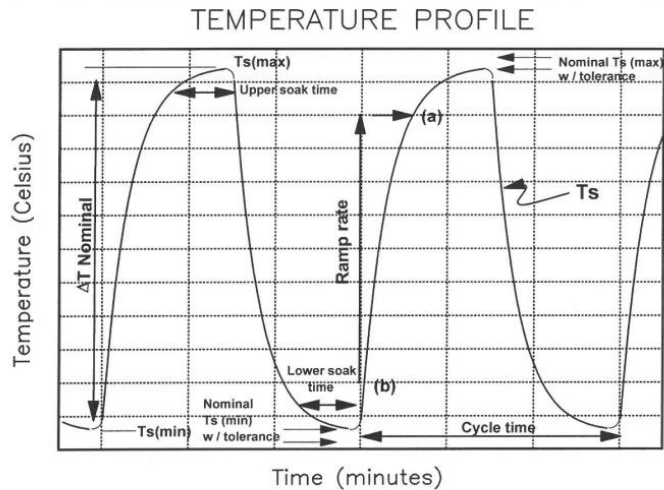


Figure 1 — Representative temperature profile for thermal cycle test conditions.

NOTE Ramp rate should be measured for the linear portion of the profile curve, which is generally the range between 10% and 90% of the Test Condition temperature range; see points a and b in Figure 1.

Obrázek 19: Normy pro nastavení teplot

2.5 Tabulky naměřených hodnot

V tabulkách 9 – 17 máme naměřené hodnoty během procesu stárnutí. V tabulkách 18 – 20 jsou zaznamenány nejnižší, nejvyšší a průměrné hodnoty ze všech naměřených hodnot.

Tabulka 9: Měřeno před stárnutím

Měřeno před stárnutím						
15.03.2023	1_1 [mΩ]	1_2 [mΩ]	2_1 [mΩ]	2_2 [mΩ]	3_1 [mΩ]	3_2 [mΩ]
50 ks	92	91	91	90	91	90
100 ks	169	167	169	168	166	167
150 ks	278	273	277	278	275	276
200 ks	376	377	375	376	377	375
250 ks	488	486	485	487	488	486
300 ks	580	579	581	581	578	580
350 ks	676	675	666	670	662	675
400 ks	770	764	767	769	760	777
450 ks	870	869	863	867	863	876
500 ks	968	973	962	974	984	976

Tabulka 10: Měřeno po týdnu v tepelné komoře při 90 °C

Měřeno po týdnu v tepelné komoře při 90 °C						
22.03.2023	1_1 [mΩ]	1_2 [mΩ]	2_1 [mΩ]	2_2 [mΩ]	3_1 [mΩ]	3_2 [mΩ]
50 ks	95	94	97	93	96	94
100 ks	171	173	190	188	176	177
150 ks	280	281	296	288	285	283
200 ks	379	380	385	386	379	386
250 ks	490	488	487	487	478	485
300 ks	581	583	581	583	577	584
350 ks	678	679	671	677	668	680
400 ks	772	767	770	773	763	780
450 ks	870	873	867	870	869	879
500 ks	969	978	968	980	987	980

Tabulka 11: Měřeno po týdenním cyklování mezi teplotou 0 - 99,9 °C

Měřeno po týdenním cyklování mezi teplotou 0 - 99,9 °C						
29.03.2023	1_1 [mΩ]	1_2 [mΩ]	2_1 [mΩ]	2_2 [mΩ]	3_1 [mΩ]	3_2 [mΩ]
50 ks	98	97	102	96	97	95
100 ks	174	176	201	195	187	192
150 ks	282	283	298	293	290	287
200 ks	382	385	390	389	385	388
250 ks	496	491	487	487	480	486
300 ks	584	586	582	583	574	588
350 ks	680	681	676	680	671	684
400 ks	775	770	774	777	767	785
450 ks	875	878	871	876	873	884
500 ks	973	982	971	984	993	986

Tabulka 12: Měřeno po týdnu v mrazícím boxu při -40 °C

Měřeno po týdnu v mrazícím boxu při -40 °C						
05.04.2023	1_1 [mΩ]	1_2 [mΩ]	2_1 [mΩ]	2_2 [mΩ]	3_1 [mΩ]	3_2 [mΩ]
50 ks	106	98	98	95	95	97
100 ks	200	196	196	193	194	197
150 ks	297	294	292	290	291	292
200 ks	392	394	389	388	387	391
250 ks	489	493	482	486	488	491
300 ks	588	593	581	582	584	590
350 ks	686	693	677	680	681	687
400 ks	788	794	775	777	781	785
450 ks	885	893	872	875	879	884
500 ks	986	994	971	972	976	982

Po prvním cyklu stárnutí došlo k úpravě DPS, kde se na vodivou cestu u první preformy napájel měděný drát pro usnadnění a zpřesnění měření. Zbylé dráty se připojily do wago svorek.

Tabulka 13: Měřeno po úpravě DPS

Měřeno po úpravě DPS						
12.04.2023	1_1 [mΩ]	1_2 [mΩ]	2_1 [mΩ]	2_2 [mΩ]	3_1 [mΩ]	3_2 [mΩ]
50 ks	101	98	100	102	102	105
100 ks	201	196	196	201	197	205
150 ks	302	294	292	298	293	302
200 ks	401	393	390	395	389	400
250 ks	500	491	486	491	486	497
300 ks	599	589	582	587	581	595
350 ks	697	687	678	683	678	692
400 ks	796	786	775	778	776	789
450 ks	895	885	871	875	873	886
500 ks	1026	1018	1001	1004	1004	1017

Tabulka 14: Měřeno po týdnu v tepelné komoře při 90 °C po úpravě DPS

Měřeno po týdnu v tepelné komoře při 90 °C po úpravě DPS						
19.04.2023	1_1 [mΩ]	1_2 [mΩ]	2_1 [mΩ]	2_2 [mΩ]	3_1 [mΩ]	3_2 [mΩ]
50 ks	104	100	98	101	101	100
100 ks	204	200	195	199	198	200
150 ks	307	299	292	297	298	299
200 ks	408	400	389	396	396	398
250 ks	509	500	486	492	494	497
300 ks	610	601	584	590	592	595
350 ks	709	700	680	687	691	694
400 ks	812	800	778	785	790	793
450 ks	913	901	877	882	891	892
500 ks	1031	1033	1010	1014	1013	1018

Tabulka 15: Měřeno po týdenním cyklování mezi teplotou 0 - 99,9 °C po úpravě DPS

Měřeno po týdenním cyklování mezi teplotou 0 - 99,9 °C po úpravě DPS						
03.05.2023	1_1 [mΩ]	1_2 [mΩ]	2_1 [mΩ]	2_2 [mΩ]	3_1 [mΩ]	3_2 [mΩ]
50 ks	104	90	99	101	102	102
100 ks	204	191	197	198	203	201
150 ks	304	285	294	296	298	299
200 ks	404	380	392	394	395	396
250 ks	503	484	488	490	492	493
300 ks	602	586	585	588	589	591
350 ks	702	690	680	684	686	689
400 ks	801	788	777	781	785	786
450 ks	901	888	874	878	883	886
500 ks	1034	1018	1005	1003	1015	1021

Tabulka 16: Měřeno po týdnu v mrazáku při -40 °C po úpravě DPS

Měřeno po týdnu v mrazáku při -40 °C po úpravě DPS						
10.05.2023	1_1 [mΩ]	1_2 [mΩ]	2_1 [mΩ]	2_2 [mΩ]	3_1 [mΩ]	3_2 [mΩ]
50 ks	103	103	102	105	103	101
100 ks	202	200	199	201	200	201
150 ks	303	298	296	296	298	300
200 ks	402	396	394	394	394	398
250 ks	501	492	492	489	491	496
300 ks	600	592	587	585	585	595
350 ks	698	689	683	680	684	692
400 ks	798	787	781	775	781	788
450 ks	897	886	879	872	879	878
500 ks	1030	1020	1009	1000	1006	1018

Tabulka 17: Měřeno po týdnu v tepelné komoře při 90 °C po úpravě DPS

Měřeno po týdnu v tepelné komoře při 90 °C po úpravě DPS						
17.05.2023	1_1 [mΩ]	1_2 [mΩ]	2_1 [mΩ]	2_2 [mΩ]	3_1 [mΩ]	3_2 [mΩ]
50 ks	104	100	105	102	99	102
100 ks	204	200	199	198	197	201
150 ks	306	301	298	295	294	299
200 ks	407	399	395	391	393	397
250 ks	506	498	492	486	491	495
300 ks	609	598	589	588	588	591
350 ks	707	695	685	681	686	689
400 ks	809	784	783	777	785	786
450 ks	907	872	879	889	885	884
500 ks	1041	1023	1011	1003	1015	1012

Tabulka 18: Minimální hodnota výsledků všech naměřených hodnot

Minimální hodnota výsledků všech naměřených hodnot						
	1_1 [mΩ]	1_2 [mΩ]	2_1 [mΩ]	2_2 [mΩ]	3_1 [mΩ]	3_2 [mΩ]
50 ks	92	90	91	90	91	90
100 ks	169	167	169	168	166	167
150 ks	278	273	277	278	275	276
200 ks	376	377	375	376	377	375
250 ks	488	484	482	486	478	485
300 ks	580	579	581	581	574	580
350 ks	676	675	666	680	662	675
400 ks	770	764	767	769	760	777
450 ks	870	869	863	867	863	876
500 ks	968	973	962	972	976	976

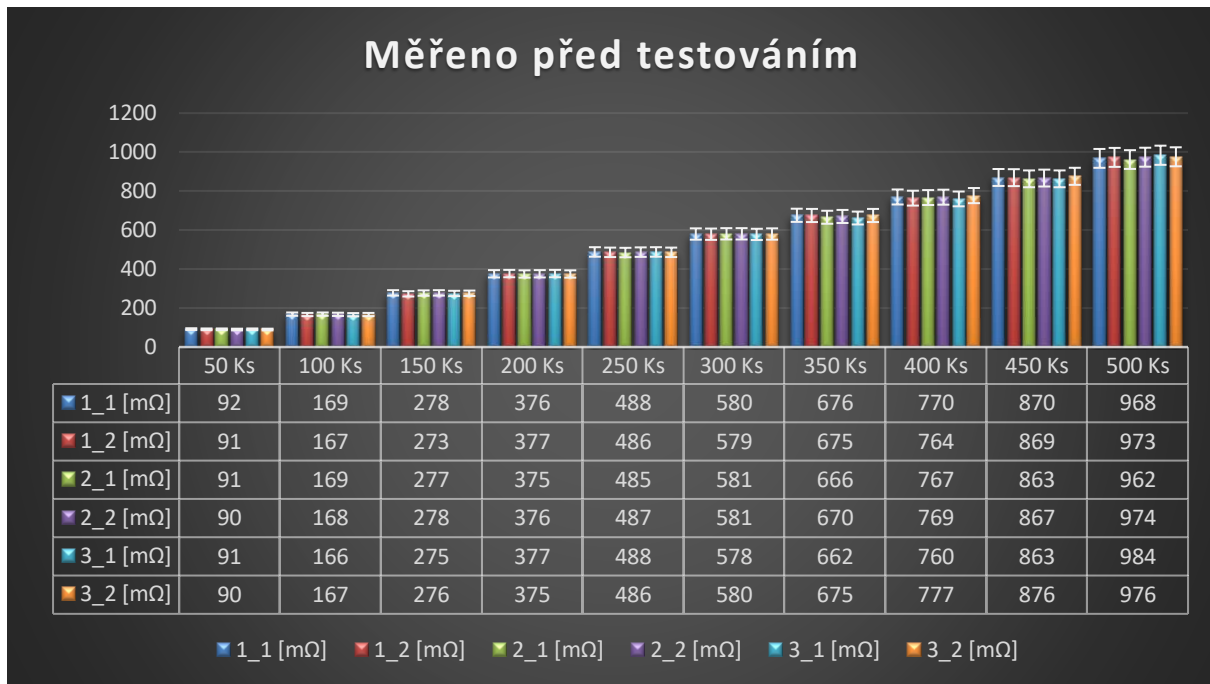
Tabulka 19: Maximální hodnota výsledků všech naměřených hodnot

Maximální hodnota výsledků všech naměřených hodnot						
	1_1 [mΩ]	1_2 [mΩ]	2_1 [mΩ]	2_2 [mΩ]	3_1 [mΩ]	3_2 [mΩ]
50 ks	106	103	105	105	103	105
100 ks	204	200	201	201	203	205
150 ks	307	301	298	298	298	302
200 ks	408	400	395	396	396	400
250 ks	509	500	492	492	494	497
300 ks	610	601	589	590	592	595
350 ks	709	700	685	687	691	694
400 ks	812	800	783	785	790	793
450 ks	913	901	879	889	891	892
500 ks	1041	1033	1011	1014	1015	1021

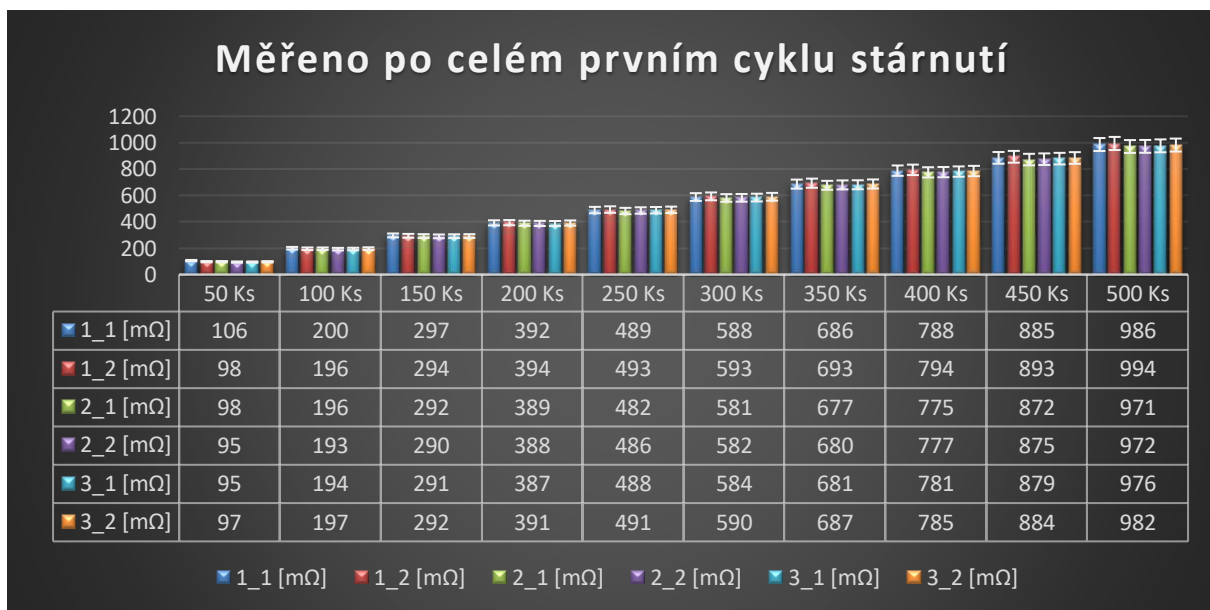
Tabulka 20: Průměrná hodnota výsledků všech naměřených hodnot

Průměrná hodnota výsledků všech naměřených hodnot						
	1_1 [mΩ]	1_2 [mΩ]	2_1 [mΩ]	2_2 [mΩ]	3_1 [mΩ]	3_2 [mΩ]
50 ks	101	97	99	98	98	98
100 ks	192	189	194	193	191	193
150 ks	295	290	293	292	291	293
200 ks	395	389	389	390	388	392
250 ks	498	491	487	488	488	492
300 ks	595	590	584	585	583	590
350 ks	693	688	677	672	679	687
400 ks	791	782	776	777	776	785
450 ks	890	883	873	876	877	883
500 ks	1006	1004	990	993	999	1001

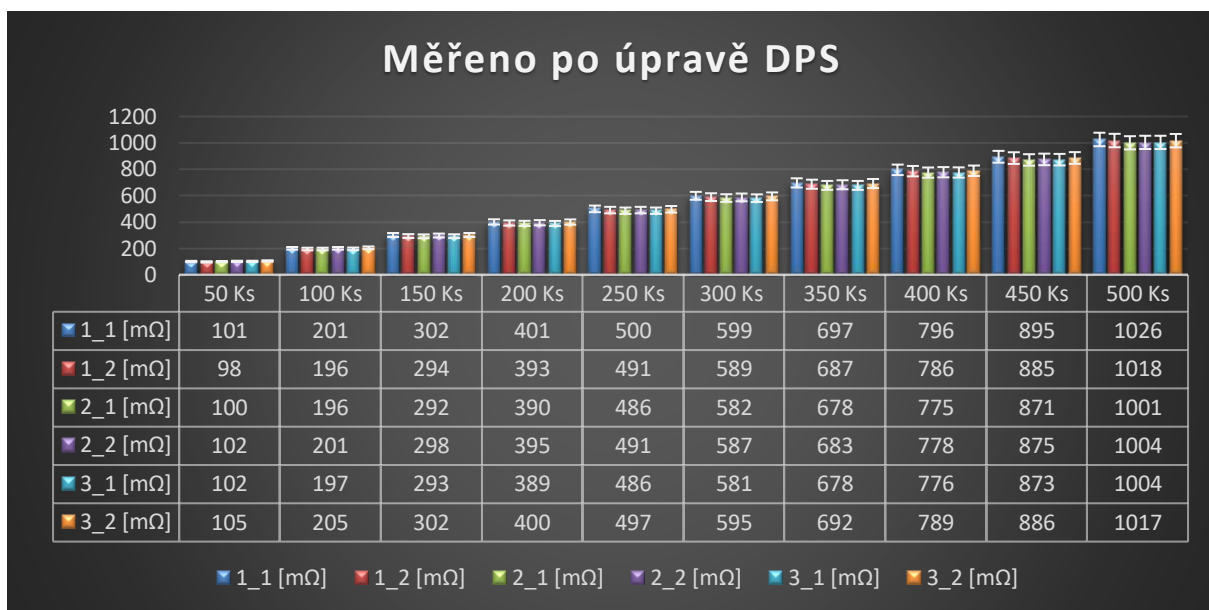
2.5.1 Grafické znázornění naměřených hodnot



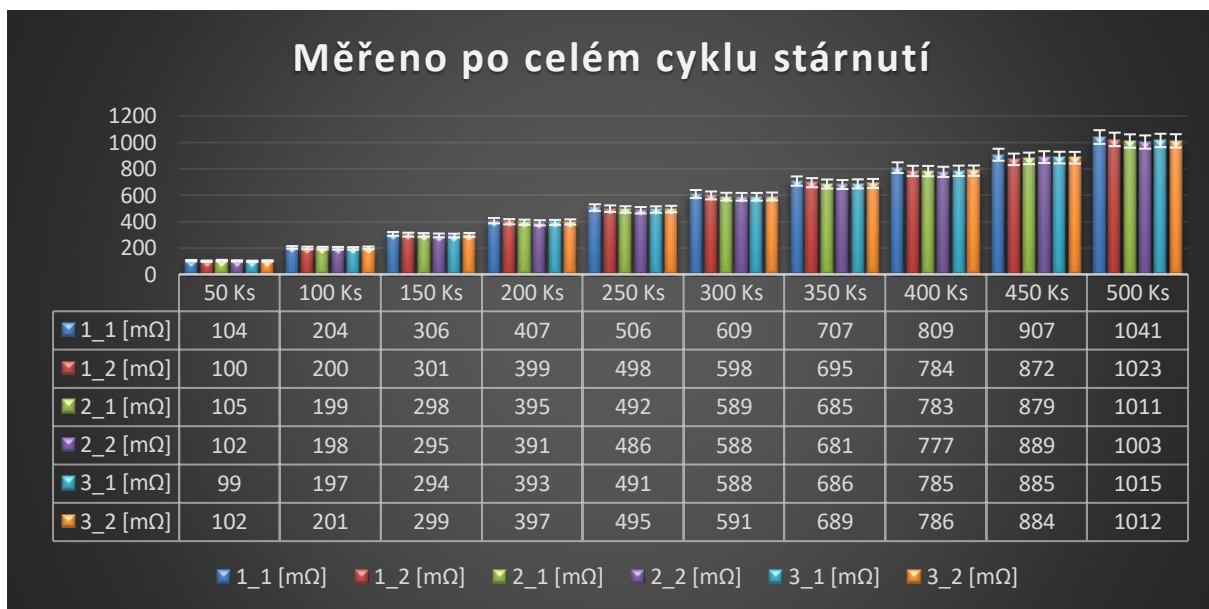
Obrázek 20: Graf měřeno před testováním



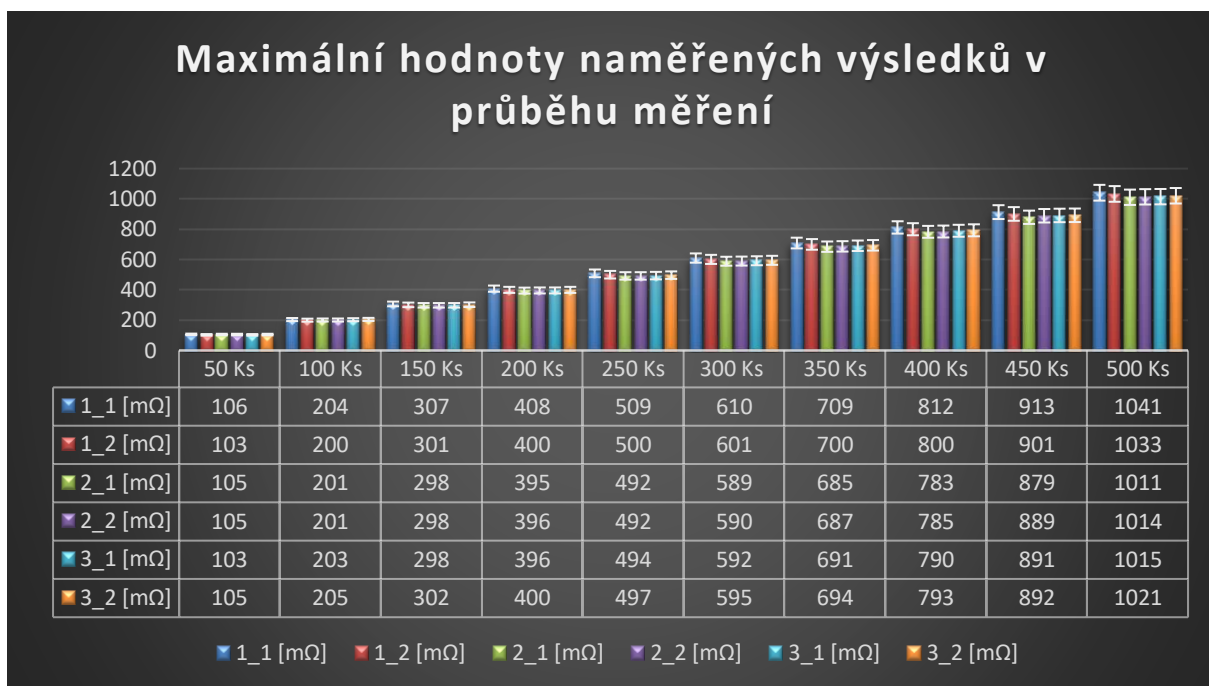
Obrázek 21: Graf měřeno po celém prvním cyklu stárnutí



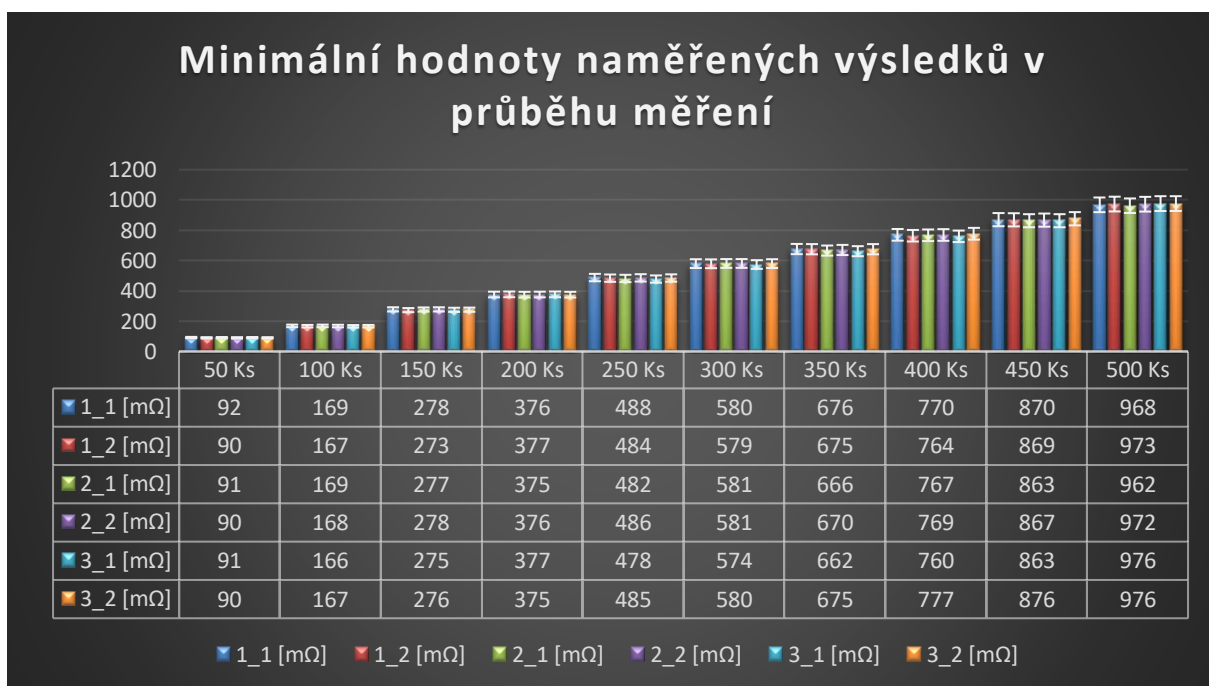
Obrázek 22: Graf měřeno po renovaci DPS



Obrázek 23: Graf měřeno po celém cyklu stárnutí



Obrázek 24: Graf maximální hodnoty naměřených výsledků v průběhu měření



Obrázek 25: Graf minimální hodnoty naměřených výsledků v průběhu měření

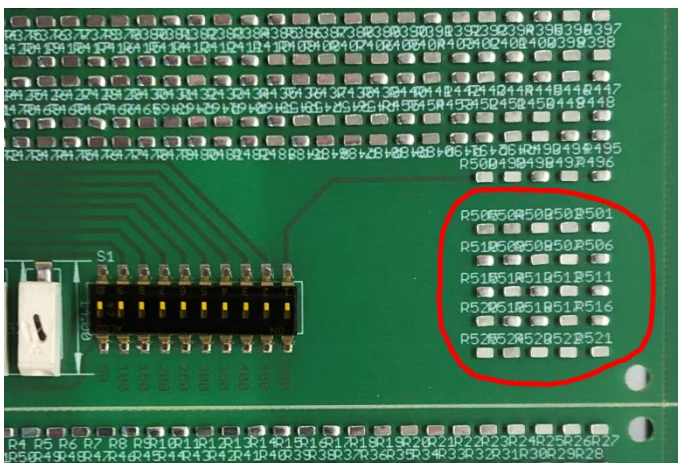
Z grafů jsou vidět největší změny u vzorku 1_1 a 1_2, kdy postupem stárnutí, začal odpor narůstat. Jedná se o vzorek s nejnižším přetavením. U ostatních vzorků, se odpor v závislosti na stárnutí tolik neměnil. Bílá část nám znázorňuje odchylku naměřených hodnot v daných sekcích.

2.5.2 Vyhodnocení naměřených hodnot

Vzorky byly označeny čísly, kde 1_1 byl vzorek s nejnižším bodem přetavení, 2_1 vzorek s nejvyšším bodem přetavení a 3_1 vzorek s nejvyšším bodem přetavení a dvojnásobnou realizací přetavení. Z naměřených hodnot, můžeme vidět mírný nárůst odporu od počátku měření. Kde nejvyšší, nejnižší a průměrná zaznamenaná hodnota je v tabulkách 2.5. Z dosažených výsledků můžeme říct, že stárnutí jakéhokoliv typu, ať už teplota 90 °C, cyklování, či teplota pod bodem mrazu, mělo na vzorky podobný vliv.

2.6 Mikrovýbrusy

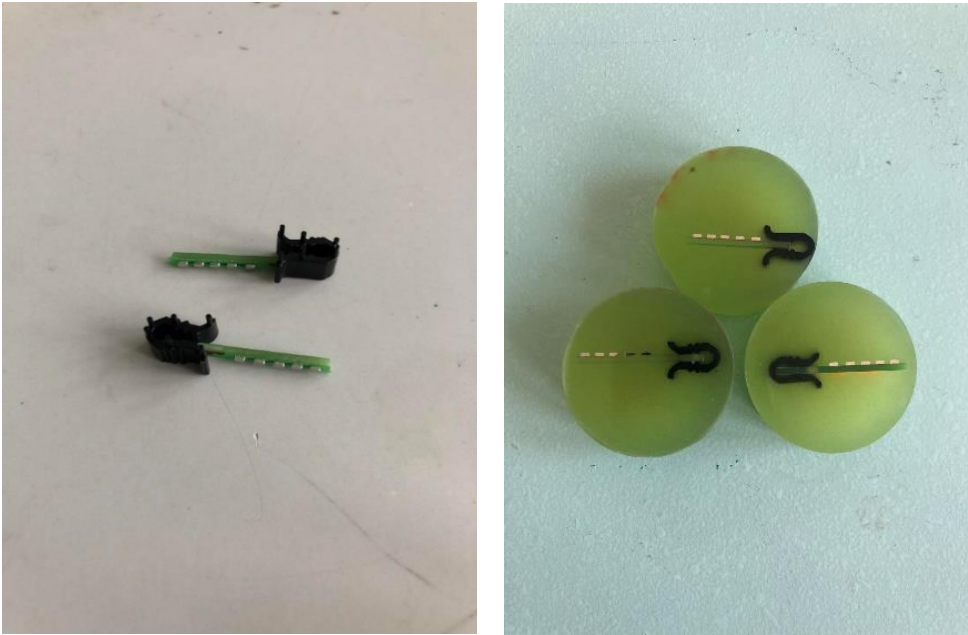
Pro zkoumání pájených spojů ve vnitřní struktuře (v řezu), jsem vytvořil několik mikrovýbrusů. Jedná se o destruktivní metodu, před zahájením testování jsem si z DPS vyřízl pomocí brusky s diamantovým kotoučem kousek vzorku, které jsem měl z návrhu připravené přesně pro mikrovýbrus. To samé jsem potom udělal hned po konci testování. Na každém vzorku je 5 ks preforem, pro zkoumání kvality přetavení pájecí pasty včetně voidů a měření tloušťky intermetalické oblasti. Na obrázku č. 26, je zobrazená oblast ze které jsem bral vzorky pro mikrovýbrusy.



Obrázek 26: Oblast pro mikrovýbrus

2.6.1 Zhotovení mikrovýbrusu

Pro oddělení plochy, jsem použil brusku s diamantovým kotoučem. Výhodou kotouče je přesně a rychlé dělení. Mimo brusky, lze také použít listovou pilku, frézku a nebo nůžky (pokud by jsme použili pákové nůžky, mohla by vzniknout příčná síla, která má negativní vliv na delaminaci Cu motivu od FR-4 na poškození pájeného spoje). Vzorek je očištěn od nežádoucích nečistot. Vzorky je nutno umístit kolmo ke dnu formy, při zalévání směsi se musí dávat pozor na pohyb vzorku (mohlo by dojít totiž ke skreslení výsledků). Proto jsem použil pomocné plastové úchyty, které jsou na obrázku č. 27.



Obrázek 27: Vlevo vzorky připravené pro zalití směsí a vpravo vzorky připravené na pozorování

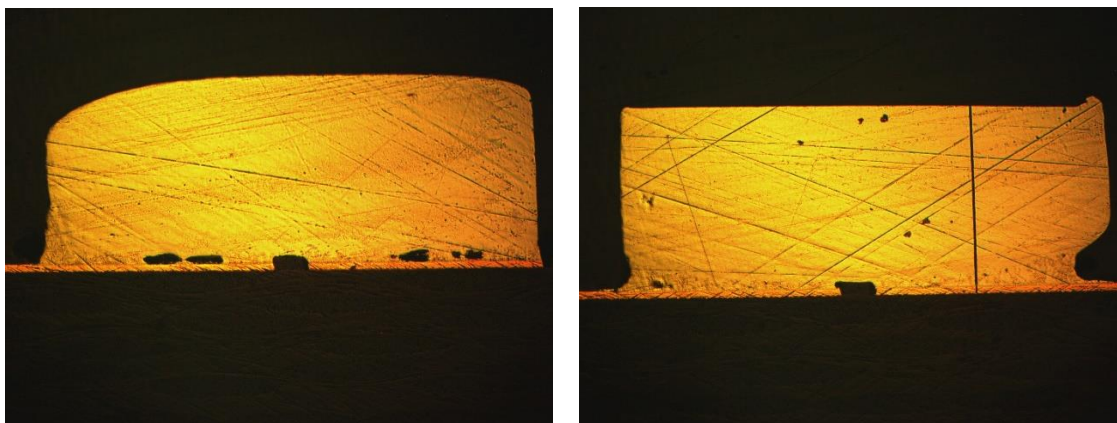
Zalévací směs je použita pryskyřice KEM 30 (Methylmetakrylát), který se skládá ze dvou složek prášek + tvrdidlo. Ta se připraví pomocí mícháním jeho složek v poměru 2:1 – 2 díly prášku a 1 díl kapaliny. Míchání probíhá pár vteřin a následně se nalije do předem připravených forem. Zalévání musí probíhat pomalu, jak jsem zmínil vzorek musí stát kolmo a být uprostřed formy. Tuhnutí zabere dle technického listu cca 5 minut, pro naše aplikace jsme ponechali prodlevu tuhnutí na 1 den v pokojové teplotě. Po vytvrzení jsem vzorek očistil od nečistot a začal brousit pomocí automatické dvoukotoučové brusce SAPHIR 530 obrázek č. 28, kde se začalo se smirkovým papírem 180 poté 600 a na závěr pro uhlazení 1200. Po broušení se smirkovými papíry se vzorky vyleštily diamantovou emulzí 0,01 mikronu a začal jsem je sledovat pod mikroskopem.



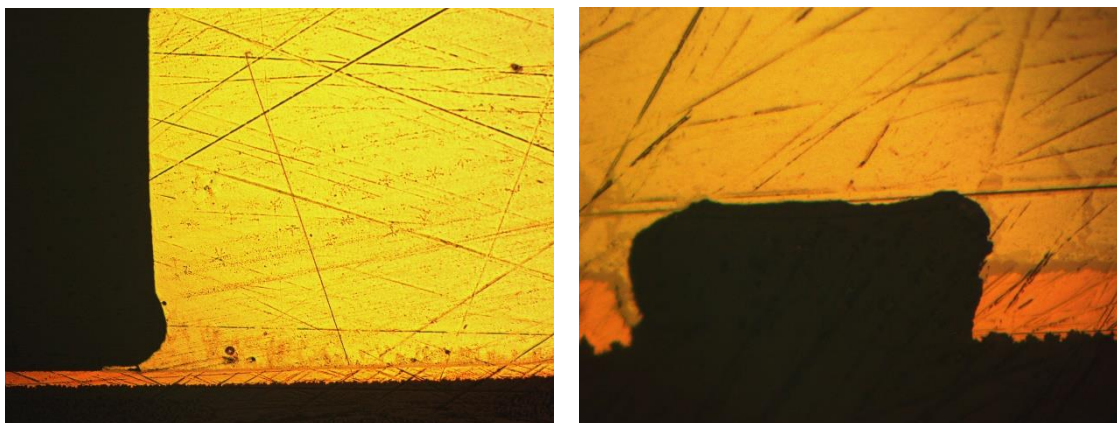
Obrázek 28: Dvoukotoučová bruska SAPHIR 530

2.6.2 Pozorování pájecí pasty a oblast voidů pod metalografickým mikroskopem

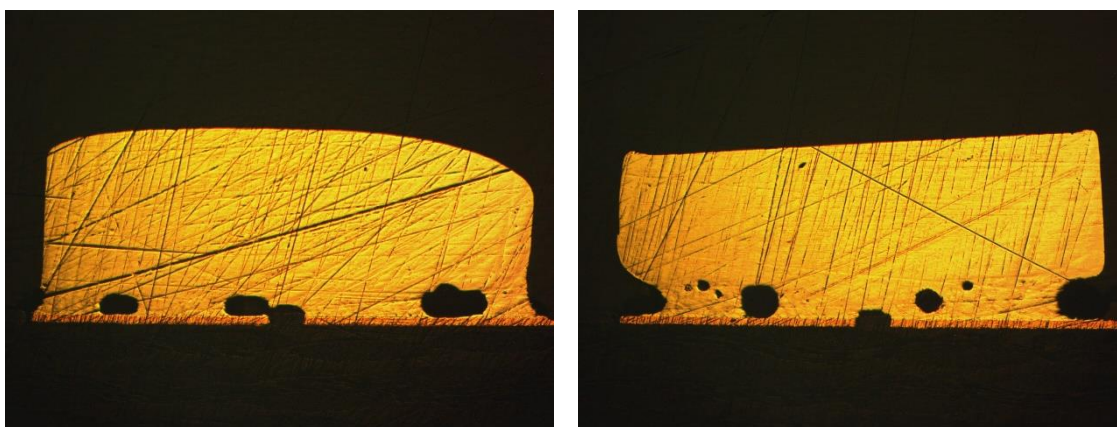
Pozorování vzorků probíhalo pomocí metalografického mikroskopu, kde se pozorovalo chování pájecí pasty a preforem. Mikroskop se musel nastavit tak, abychom byli schopni rozeznat typ materiálu v našem případě to znamenalo rozdělení preforem SAC, pájecí pasty SnAgBi a měděných kontaktů.



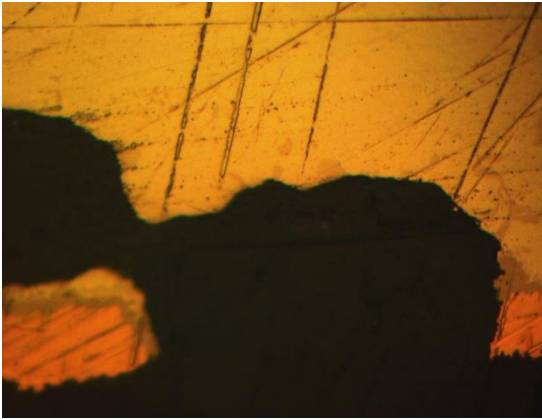
Obrázek 29: Vzorek 1_2 1.V po celém cyklu stárnutí



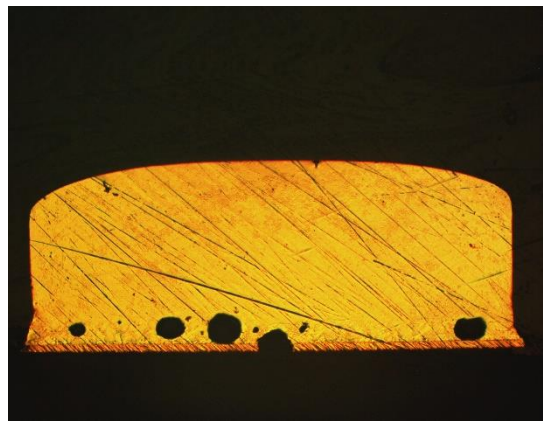
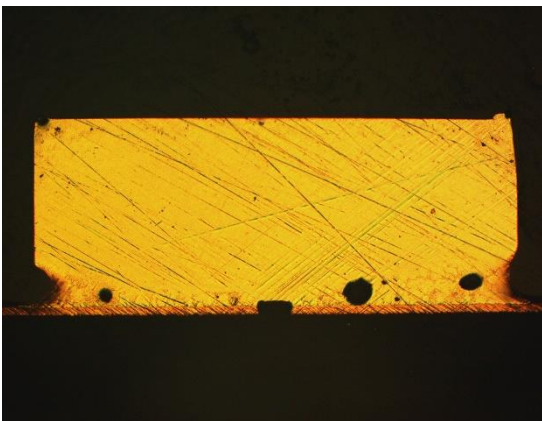
Obrázek 30: Vzorek 1_2 1.V po celém cyklu stárnutí detail



Obrázek 31: Vzorek 3_2 1.V před cyklem stárnutí



Obrázek 32: Vzorek 3_2 1.V před cyklem stárnutí detail mezery



Obrázek 33: Vzorek 3_2 2.V po celém cyklu stárnutí



Obrázek 34: Vzorek 3_2 2.V po celém cyklu stárnutí detail mezery

Pod mikroskopem jsem pozoroval, jak kvalitně byly preformy zapájeny, případně jestli se nevyskytují voidy. Z fotografií pořízených z mikroskopu můžeme vidět spousty voidů, které se objevily v pájecí pastě. Bylo zajímavé sledovat tvary voidů. Ze začátku jsem si myslel, že za vinou jsou otočené preformy ale nakonec se ukázaly podobné tvary i na otočených kusech preforem. U vzorku 3_2 jsem vypožoroval sloučení preformy s pájecí pastou, důvodem tohoto jevu, je nejvyšší teplota tavení, která byla na tomto vzorku použita 2x. Také jsem si všiml, že preformy, které jsou otočeny, mají na jedné straně více pasty než-li na druhé. Co se týče mezery mezi pady, tak můžeme vidět, že se pasta u každého vzorku chovala odlišně, u vzorku 1_2 se vytvořila válcový tvar, zatím co u vzorku 3_2 se vytvořil tvar kruhový.

2.6.3 Pozorování intermetalické oblasti pod metalografickým mikroskopem

Intermetalická oblast je sloučenina minimálně dvou různých kovů, která mají odlišné chemické vlastnosti ve srovnání s čistými kovy. Vlivem metalurgické reakce dochází k reakci aktivního prvku (zejména cínu) s materiálem pájecí plošky a dochází k jejich smáčení, adhezi a následného formování IMC na rozhraní obou materiálů. Před pozorováním pod mikroskopem, se muselo zkalibrovat měření pomocí posuvného měřítka, kterým se daná oblast měřila. Oblast se zkoumala pod zvětšením mikroskopu 500x a výsledky naměřených hodnot jsem zpracoval do přehledných tabulek 21 – 23. Před celým procesem, se vzorky musely lépe vyleštit, pro viditelnější znázornění intermetalické oblasti, proto jsou obrázky trochu odlišné. Celý tento jev je žádoucí z hlediska smáčivosti a metalurgickému propojení, jelikož je to klíčové pro spolehlivý pájený spoj.

Tabulka 21: Naměřené hodnoty intermetalické oblasti 1_2 2.V

vzorek 1_2 2.V	naměřená hodnota 1 [μm]	naměřená hodnota 2 [μm]	naměřená hodnota 3 [μm]	naměřená hodnota 4 [μm]	naměřená hodnota 5 [μm]	průměrná hodnota	směrodatná odchylka
preforma 1	3,76	3,51	3,39	3,51	2,51	3,34	0,43
preforma 2	4,14	4,39	3,51	3,76	3,51	3,86	0,35
preforma 3	4,14	4,4	4,65	4,01	5,02	4,44	0,36
preforma 4	5,02	4,64	4,39	3,39	4,51	4,39	0,54
preforma 5	4,39	5,02	4,65	4,26	4,39	4,54	0,27

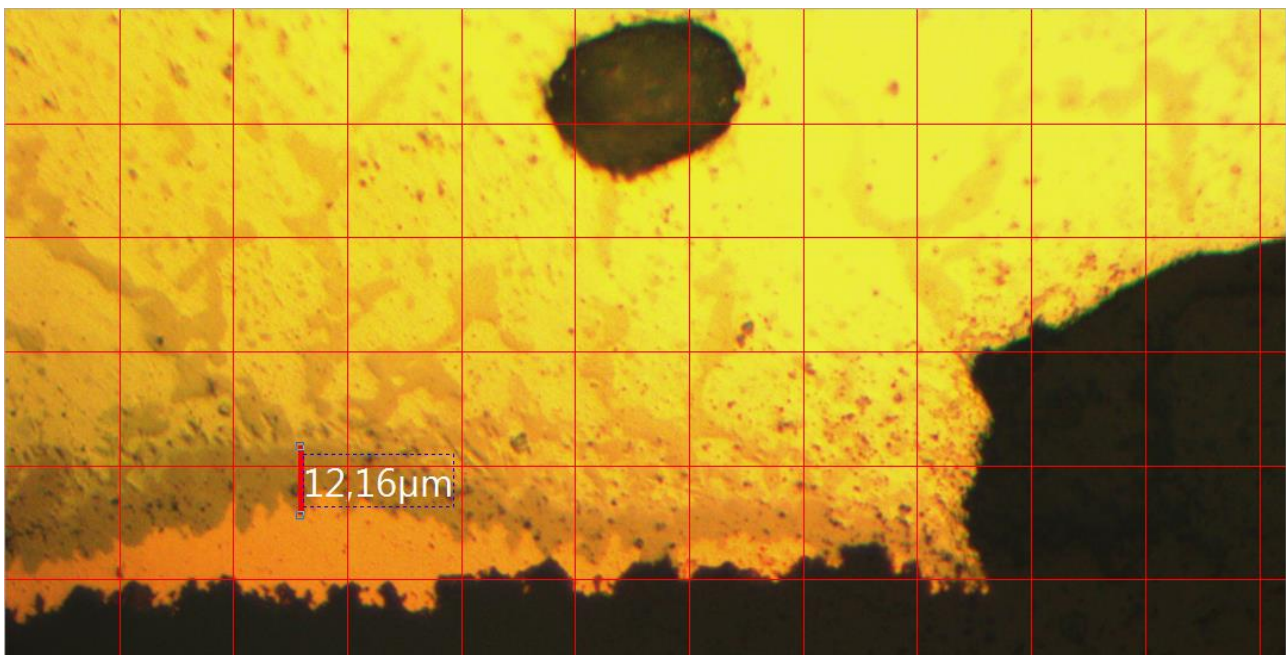
Tabulka 22: Naměřené hodnoty intermetalické oblasti 3_2 1.V

vzorek 3_2 1.V	naměřená hodnota 1 [μm]	naměřená hodnota 2 [μm]	naměřená hodnota 3 [μm]	naměřená hodnota 4 [μm]	naměřená hodnota 5 [μm]	průměrná hodnota	směrodatná odchylka
preforma 1	12,16	13,39	12,4	12,65	12,16	12,55	0,46
preforma 2	2,76	2,77	3,14	3,14	2,88	2,94	0,17
preforma 3	3,76	3,88	3,64	3,76	3,64	3,74	0,09
preforma 4	3,76	3,64	3,76	3,89	2,88	3,59	0,36
preforma 5	4,39	3,39	3,76	3,89	4,45	3,98	0,40

Tabulka 23: Naměřené hodnoty intermetalické oblasti 3_2 2.V

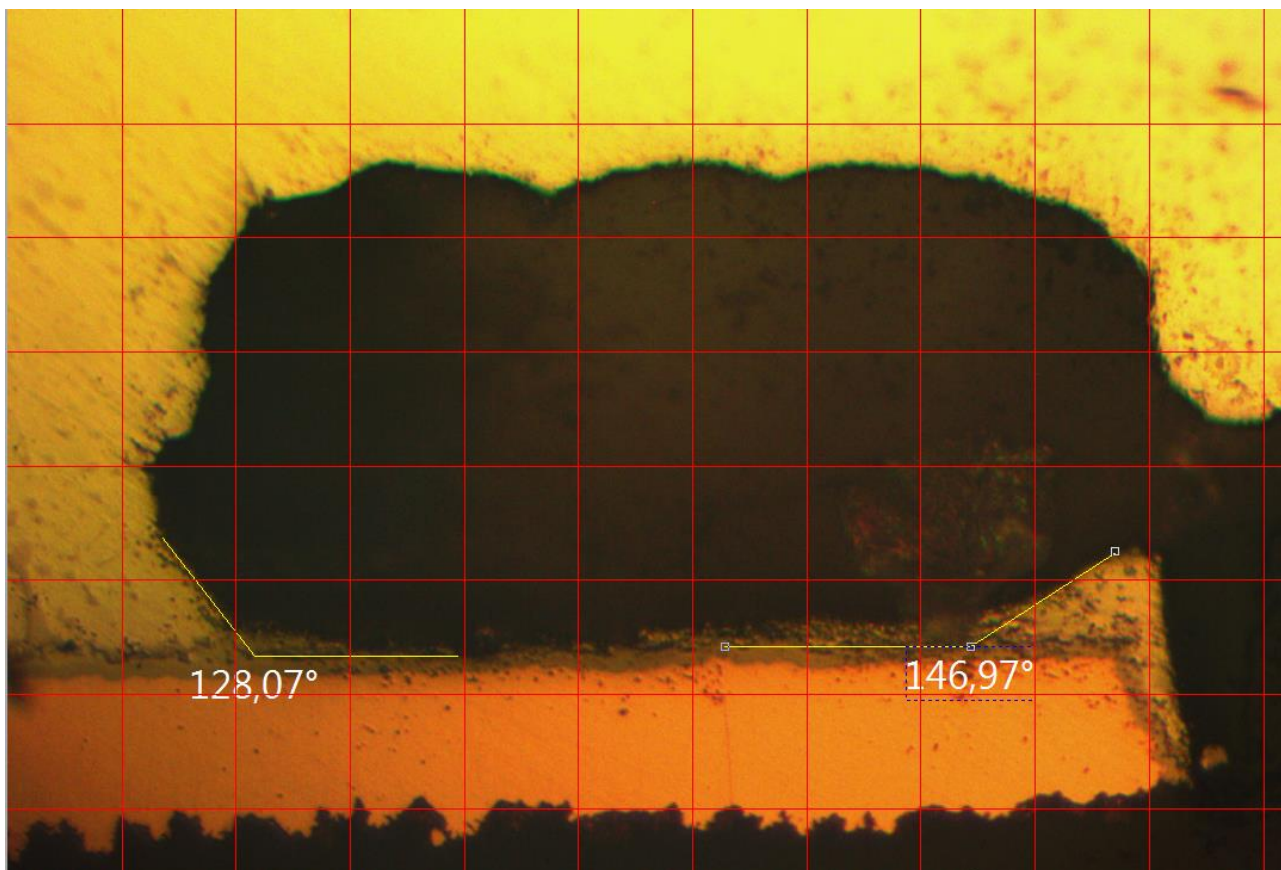
vzorek 3_2 2.V	naměřená hodnota 1 [μm]	naměřená hodnota 2 [μm]	naměřená hodnota 3 [μm]	naměřená hodnota 4 [μm]	naměřená hodnota 5 [μm]	průměrná hodnota	směrodatná odchylka
preforma 1	5,77	5,02	5,27	3,14	5,64	4,97	0,95
preforma 2	5,64	4,77	5,64	5,02	4,39	5,09	0,49
preforma 3	4,01	4,4	4,77	5,14	4,03	4,47	0,44
preforma 4	4,64	4,79	4,26	4,31	3,78	4,36	0,35
preforma 5	4,26	4,14	4,64	4,64	3,51	4,24	0,42

Z dosažených výsledků, můžeme vypořizovat, chování intermetalické oblasti u jednotlivých vzorků a preforem. Naměřené hodnoty jsem zpracoval do tabulky, vypočítal průměrnou hodnotu a směrodatnou odchylku. Závěrem pozorování je nárůst intermetalické složky, kde u nejnižšího teplotního profilu se průměrná hodnota pohybovala okolo 4,11 μm, zatím co u vyššího teplotního profilu se průměrná hodnota pohybovala okolo 4,62 μm. U vzorku 3_2 1.V jsem musel zanedbat naměřené hodnoty z preformy 1, jelikož došlo k narušení homogenity z neznámých důvodů viz. obrázek 35.



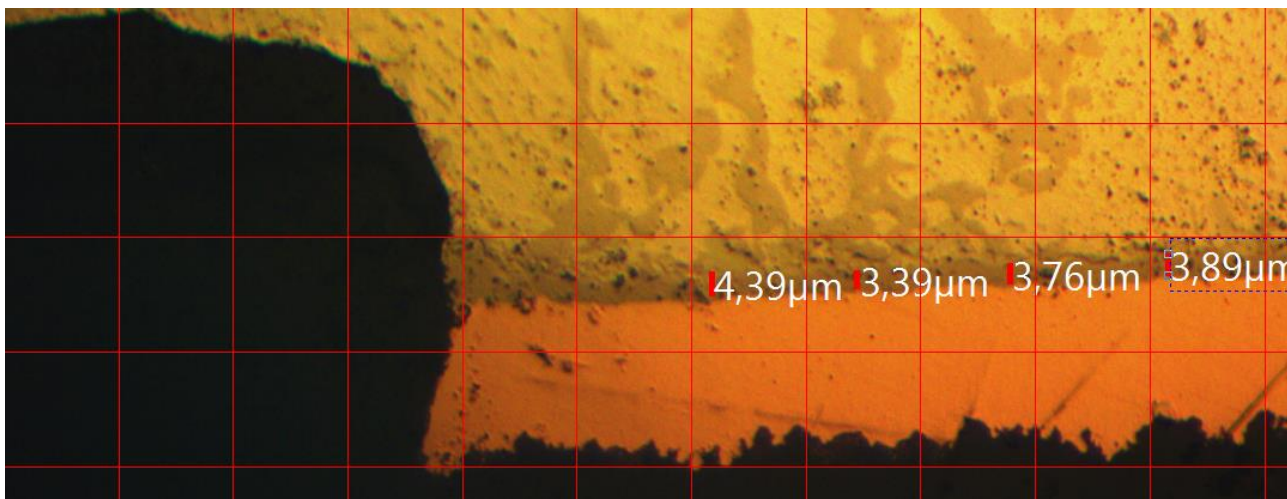
Obrázek 35: Detail defektu u vzorku 3_2 1.V preforma 1

Na obrázku 36, můžeme detailněji vidět void a jeho smáčecí úhel. Nalevo se smáčecí úhel pohyboval okolo 128° a napravo je úhel 147°. Dále zde můžeme vidět část intermetalické části, která se nachází v oblasti voidu. Vidíme, že z důvodu vytvořeného procesního voidu se v intermetalické oblasti nedějí žádné výrazné změny, jelikož se v části nenachází žádná pájecí slitina.



Obrázek 36: Měření úhlů u defektu (voidu)

Pro znázornění intermetalické složky a jejího chování, můžeme vidět na obrázku 37. Zde pozorujeme, že dochází ke sloučení intermetalické oblasti s pájecí slitinou.



Obrázek 37: Intermetalická oblast a její chování

Z dosažených výsledků pozorování pod metalografickým mikroskopem můžeme vyhodnotit, jaké má intermetalická oblast rozměry a pod jakými úhly se nám vyskytují voidy. Bohužel nemohlo proběhnout pozorování pod elektronovým mikroskopem z důvodu odstávky, tudíž se akorát můžeme domnívat jaké sloučeniny nám v té oblasti vznikly. Ale jelikož se povrchová úprava DPS (která je popsána v části 2.2), skládá z chemického niklu (Ni) a imerzního zlata (Au), můžeme odhadnout, že se intermetalická oblast bude skládat z % niklu, cínu a mědi, jelikož zlata je obsaženo opravdu minimum, můžeme ho zanedbat.

3 Závěr

Bakalářská práce se zabývá pozorováním, chováním a kompatibilitou nízkoteplotní bezolovnaté pájecí pasty Sn42Ag1Bi57 s nejpoužívanější pájecí slitinou typu SAC305 (Sn96,5Ag3Cu0,5) ve formě preformy. Tato preforma nahrazovala SMD součástku velikosti 0805. Materiálová kombinace byla podrobena klimatickým zkouškám s průběžným vyhodnocováním změn odporu i porovnáním růstu intermetalické oblasti.

Teoretická část bakalářské práce popisuje vlastnosti a rozdělení bezolovnatých pájek a pájecích slitin, analyzuje problematiku teplotních profilů a popisuje čtyřbodovou metodu měření. Popisují se i klimatické komory, ve kterých probíhalo stárnutí vzorků.

Praktická část řeší zadanou problematiku od prototypu DPS, vytvoření DPS pro stárnutí vzorků a s průběžným měřením hodnoty odporů, včetně sledování intermetalické části pod mikroskopem. Pro všechny DPS byla použita stejná pájecí pasta Sn42Ag1Bi57 – NC273LT a jako náhrada za osazení součástek byly použity preformy s označením Sn96,5Ag3Cu0,5. Nastavení teplotních profilů bylo pro testovací DPS odlišné, kde na prvním testovacím vzorku byla použita nejnižší teplota tavení (158 °C), pro druhý testovací vzorek nejvyšší teplota tavení (185 °C), totéž bylo použito i pro třetí testovací vzorek ale s rozdílem toho, že byl přetaven dvojnásobně. Vše proběhlo ve spolupráci s firmou RESIDEO-Honeywell. Vyhodnocené pájené preformy vyhovují normě normy IPC-A-610. Vzorky se pak nechaly stárnout v klimatických komorách. Po prvním cyklu teplotního stárnutí 90°C/týden a na konci cyklu stárnutí se z desek odřízlo část spoje pro mikrovýbrusy, na pozorování intermetalických sloučenin.

Vyhodnocování výsledků bylo zaznamenáváno do přehledných tabulek a měření probíhalo pomocí čtyřbodové metody, kde vzorky byly měřeny při 40 °C, aby nedocházelo k ovlivnění měření kolísáním teplot. Po celém cyklu stárnutí, můžeme vyhodnotit výsledky tak, že největší změna odporu se objevila u vzorku s nejnižší teplotou přetavení. U vzorku s nejvyšší hodnotou přetavení se odpor v závislosti na stárnutí o tolik neměnil, ale postupem času a delšího procesu stárnutí, lze předpokládat, že výrazně delším stárnutím by došlo k výrazně větším rozdílům.

Při pozorování pod metalografickým mikroskopem, byly pozorovány tloušťky intermetalické oblasti a úhly voidů. Intermetalická oblast se chovala přesně dle teoretických předpokladů, kde u vzorku s nejnižší teplotou přetavení se průměrná tloušťka pohybovala okolo 4,11 μm, zatím co u vzorku s vyšší teplotou přetavení se průměrná tloušťka pohybovala okolo 4,62 μm. Vzorek 1_2 1. Mezi vzorkem 3_2 1.V a 3_2 2.V byl zaznamenán nárůst intermetalické oblasti v závislosti na stárnutí vzorku přibližně v průměru 1 μm. V nemohl být pozorován, z důvodu jeho zničení při mikrovýbrusech. Z důvodu nefunkčního elektronového mikroskopu jsme nemohli provést prvkovou analýzu intermetalické oblasti. Můžeme se pouze domnívat, jaká sloučenina se v intermetalické oblasti nachází, ale víme, že povrchová úprava byla pomocí imerzního zlata a chemického niklu. Můžeme usoudit, že došlo k % sloučení složek niklu, mědi a cínu. Tenká vrstva zlata během procesu smáčení začíná velmi rychle difundovat do roztavené pájky.

Vzhledem k obsáhlosti problematiky bezolovnatých pájecích past, nelze stanovit z dosažených výsledků jednoznačný závěr. Vlastnosti pájecí pasty Sn42Ag1Bi57 by bylo potřeba detailněji prozkoumat při delším stárnutí v klimatických podmínkách a sledování kompatibility z hlediska mechanických vlastností. Náměty na pokračování práce, by byly delší prodlevy v teplotní komoře včetně cyklování a eventuelně i v šokových zkouškách, včetně pozorování intermetalické oblasti pod elektronovým mikroskopem.

Bibliografie

- [1] Szendiuch, Ivan. Pájení a bezolovnaté pájky [online] [citováno 2018-03-15].
Dostupné z: <<http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>>.
- [2] Starý, Jiří.; Kahle, Petr. Plošné spoje a povrchová montáž [online]. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z:
<https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=21618>.
- [3] Abtev, Mulugeta. Lead-free soldem in microelectronics [online].
[citováno 2018-03-15] Dostupné z:
<<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0927796X00000103>>
- [4] Szendiuch, Ivan. Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. 1.vyd.
VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-3292-6.
- [5] Hwang J. S. - Environment - friendly electronics: Lead free technology,
Electrochemical Publications Ltd 2001 - ISBN 0 901150 40 1
- [6] Miric, A. Z.; GRUSD, Angela. Lead – free alloys [online]. [citováno 2011-11-20].
Dostupné z: <http://tersted.home.xs4all.nl/PDF_files/Heraeus/AM_AG_PBFREE.pdf>.
- [7] Nihonsuperior [online]. 2007. 2009 [cit. 2010-05-23]. Výrobce pájek Nihonsuperior.
Dostupné z WWW: <Výrobce pájek Nihonsuperior>.
- [8] SMT centrum. Srovnání pájecích slitin SAC a Sn100 [online]. Vydáno: 31.12.2009
[citováno 2011-11-21]. Dostupné z:
<<http://www.smtcentrum.cz/vyberpajecichslitin/srovnani-pajecich-slitin-sac-a-sn100>>.[]
- [9] R.J. Klein Wassink, Soldering in Electronics, Elektrochemical Publications, 1989
- [10] „PF602-P30 T4 Lead Free Paste 600g Cartridge”, Link Hamson.
- [11] „PF602-P30”, Nevo | Partnership in Solder Technology Innovation.
- [12] „Cobar-OT2-SnBi-T3/T4”, Solders, Anodes, alloys and wires for electronic
industry and surface refinement - Balver Zinn.

- [13] „Pájecí pasty - Cobar SAC3-XF3+“, Pájení, osazování, sítotisk, čištění elektronických zařízení PBT Rožnov p.R., s.r.o.
- [14] M. Abel a V. Cimburek, Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, 1. vyd. Pardubice: ABE.TEC, s.r.o., 2005.
- [15] P. Mach, V. Skočil, a J. Urbánek, Montáž v elektronice. Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Praha: ČVUT, 2001.
- [16] Procházka, M. Vliv rozdílné tepelné kapacity DPS a součástek na podélný teplotní profil u pájení přetavením – diplomová práce. Brno 2011. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D. FEKT VUT v Brně.
- [17] „Pájení v elektrotechnice“, Ústav mikroelektroniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně.
- [18] M. Adámek, C. Vaško, a M. Drlík, „Pájení v elektrotechnické výrobě Kontrola jakosti spojů“, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií vysoké učení v Brně
- [19] Banaszyk, J., et al.: The Van der Pauw Method for Sheet Resistance Measurements of Polypyrrole-Coated Para-aramide Woven Fabrics. Nano Research, 2008, Vol. 1, No. 4, p. 273–291, ISSN 1998–0124
- [20] Technologie tisku pájecí pasty Soldering Paste Printing Technology Martin Janáč Bakalářská práce 2011 dostupné z: <https://docplayer.cz/5540660-Technologie-tisku-pajeci-pasty.html>
- [21] Elektrická vodivost ve dvou rozměrech dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/archiv/mfo/47/TRANSLATION-E1-Q-CZE-%C4%8Cesky.pdf>