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

VLIV KOMBINACE PÁJECÍCH SLITIN NA VLASTNOSTI PÁJENÉHO SPOJE

THE SOLDER ALLOYS COMBINATION AND INFLUENCE ON SOLDER JOINT PROPERTIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Michal Bedlivý

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Jiří Starý, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

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

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Michal Bedlivý ***ID:*** 186807

Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Vliv kombinace pájecích slitin na vlastnosti pájeného spoje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte odbornou literaturu s problematikou pájecích slitin a uveďte možná rizika při jejich kombinacích. Preferujte bezolovnaté kombinace SAC s SnBiAg (nízkoteplotní teplotou tavení). Navrhněte desku s plošnými spoji a šablony pro dvoustupňový tisk rozdílnými pájecími pastami i slitinami s postupným přetavením. Navrhněte a odzkoušejte vhodný technologický postup. Navrhněte metodiku měření odporu a pevnost spojů, hodnocení mikrovýbrusů se sledováním homogenity pájecích slitin a SEM. Dosažené výsledky zpracujte a vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022 ***Termín odevzdání:*** 25.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a ověřením experimentu pro analýzu vlivu kombinace pájecích slitin na vlastnosti pájeného spoje v elektrotechnice.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pájený spoj, pájecí slitiny, nízkoteplotní pájky, pevnost pájeného spoje, odpor spoje.

ABSTRACT

This diploma deals with the design and vertification of an experiment for the analysis of the influence of a combination of solder alloys on the properties of a solder joints in electrical engineering.

KEYWORDS

Solder joints, solder alloys, low melting point solder aloys, solder joint mechanical strength, resistance of solder joints.

Vysázeno pomocí balíčku `thesis` verze 4.07; `http://latex.feec.vutbr.cz`

BEDLIVÝ, Michal. *Vliv kombinace pájecích slitin na vlastnosti pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2022, 78 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Starý Jiří, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Bc. Michal Bedlivý
VUT ID autora:	186807
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	Vliv kombinace pájecích slitin na vlastnosti pájeného spoje

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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno ....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod **12**

Cíle práce **13**

1 Teoretická část studentské práce **14**

1.1 Pájený spoj 14

1.1.1 Požadavky na vlastnosti pájeného spoje 14

1.2 Pájecí slitiny v elektrotechnice 15

1.2.1 SnPb 15

1.2.2 Bezolovnaté pájky 15

1.2.3 Směs pájek 17

1.3 Pájení přetavením 17

1.4 Defekty pájení 17

1.4.1 Tvorba dutin ve spoji 18

1.4.2 Odvzlínání 18

1.4.3 Zvedání součástek 19

1.4.4 Praskliny ve spoji 19

1.4.5 Cínové whiskery 20

1.4.6 Cínový mor 21

1.4.7 Intermetalické vrstvy 22

2 Návrh a příprava experimentu **23**

2.1 Návrh DPS 23

2.1.1 Měření odporu pájených spojů 23

2.1.2 Mikrovýbrusy 23

2.1.3 Měření pevnosti pájeného spoje 24

2.1.4 Testovací plochy 24

2.1.5 Výroba DPS 26

2.1.6 Výroba šablony pro tisk pasty 26

2.1.7 Výpočet objemu nanesené pasty a složení výsledné pájky. . . . 28

2.2 Technologický postup osazení 28

2.3 Měření odporu 30

2.4 Zkouška pevnosti 30

2.5 Zrychlené stárnutí 30

2.6 Mikrovýbrusy 31

3 Průběh experimentu **33**
3.1 Prvotní ověření postupu experimentu 33
3.2 Testování vlivu postupu osazení a poměru množství pájek 34
3.2.1 Postup osazení 34
3.2.2 Teplotní profil přetavení 34
3.2.3 Osazení a přetavení 35
3.2.4 Průběžné vyhodnocení testu 37
3.3 Testování s rozdílnými teplotními profily druhého přetavení 37
3.3.1 Teplotní profily 37
3.3.2 Tisk pasty a osazení 38
3.3.3 Průběžné vyhodnocení testu 39
3.4 Příprava vzorků pro mikrovýbrus 39
3.5 Zrychlené stárnutí 39
3.5.1 Průběžné vyhodnocení stárnutých vzorků 41
3.6 Vyhodnocení výsledků 43
3.6.1 Odpor 43
3.6.2 Pevnost spojů 45
3.6.3 Mikrovýbrusy 47

Závěr **69**

Literatura **71**

Seznam příloh **72**

A Teplotní profily **73**
A.1 Teplotní profil 180 240 330 v03 74
A.2 Teplotní profil 240 270 400 v03 75
A.3 Teplotní profil 260 220 360 v17 76
A.4 Teplotní profil 1260-220-380 v17 77

B Obsah elektronické přílohy **78**

Seznam obrázků

1.1 Příklad kombinace SnBiAg a SAC pájky. Závislost formování spoje na teplotním profilu přetavení. [7] . . . 18
1.2 Příklad profilu přetavení. [5] . . . 19
1.3 RTG snímek spojů s dutinami. [4] . . . 20
1.4 Příklad zvednutí součástky. [4] . . . 20
1.5 Příklad praskliny spoje. [4] . . . 21
1.6 Příklad cínových whiskerů. [6] . . . 21
2.1 Testovací DPS. . . . 24
2.2 Schéma zapojení jedné skupiny testovacích odporů. . . . 25
2.3 Schéma zapojení odporů pro mikrovýbrusy. . . . 25
2.4 Tepelné oddělení pájecích ploch. . . . 26
2.5 Detail části desky s testovacími plochami. . . . 26
2.6 Vyrobené DPS. . . . 27
2.7 Předloha pro šablonu na tisk pasty. . . . 27
2.8 Závislost teploty tavení na poměru pájek SAC305 a Sn42Bi58 [10] . . 29
2.9 Místo utržení součástky při testu střihem. . . . 31
2.10 Příklad přípravy mikrovýbrusu pro SEM.[2] . . . 32
3.1 Mikrovýbrus testovacího vzorku. . . . 34
3.2 Vrcholek spodní pájky vyčnívající nad pastu. . . . 35
3.3 Teplotní profily. . . . 38
3.4 Umístění vzorku do zalévacích forem. . . . 40
3.5 Leštění na metalografické brusce ATM. . . . 40
3.6 Umístění desek v klimatické komoře. . . . 41
3.7 Mikrovýbrus vzorků po stárnutí. . . . 42
3.8 Graf závislosti odporu na počtu teplotních cyklů. . . . 44
3.9 Snímky konfokální mikroskopie deska 1 před stárnutím. . . . 47
3.10 Snímek SEM deska 1. . . . 48
3.11 Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h) . . . 48
3.12 Snímky konfokální mikroskopie deska 2 před stárnutím. . . . 49
3.13 Snímek SEM deska 2. . . . 49
3.14 Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h) . . . 50
3.15 Snímky konfokální mikroskopie deska 3 před stárnutím. . . . 51
3.16 Snímek SEM deska 3. . . . 51
3.17 Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h) . . . 52
3.18 Snímky konfokální mikroskopie deska 4 před stárnutím. . . . 53
3.19 Snímek SEM deska 4. . . . 53
3.20 Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h) . . . 54

3.21 Snímky konfokální mikroskopie deska 5 před stárnutím. 55
3.22 Snímek SEM deska 5. 55
3.23 Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h) . . . 56
3.24 Snímky konfokální mikroskopie deska 6 před stárnutím. 57
3.25 Snímek SEM deska 6. 57
3.26 Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h) . . . 58
3.27 Snímky konfokální mikroskopie deska 7 před stárnutím. 59
3.28 Snímek SEM deska 7. 59
3.29 Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h) . . . 60
3.30 Snímky konfokální mikroskopie deska 8 před stárnutím. 61
3.31 Snímek SEM deska 8. 61
3.32 Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h) . . . 62
3.33 Snímky konfokální mikroskopie deska 9 před stárnutím. 63
3.34 Snímek SEM deska 9. 63
3.35 Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h) . . . 64
3.36 Snímky konfokální mikroskopie deska 10 před stárnutím. 65
3.37 Snímek SEM deska 10. 65
3.38 Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h) . . . 66
3.39 Snímky konfokální mikroskopie deska 11 před stárnutím. 67
3.40 Snímek SEM deska 11. 67
3.41 Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h) . . . 68

Seznam tabulek

1.1 Vlastnosti intermetalických sloučenin. [4] 22
2.1 Tabulka obsahu a objemu okna šablony. 28
2.2 Tabulka výpočtu množství a poměrů pasty. 29
2.3 Tabulka hmotnostního poměru a výsledný poměr jednotlivých složek. 29
3.1 Tabulka způsobu osazení DPS. 36
3.2 Naměřené hodnoty odporu. 43
3.3 Naměřené hodnoty pevnosti před stárnutím. 45
3.4 Naměřené hodnoty pevnosti po stárnutím. 45
3.5 Porovnání pevnosti. 46

Úvod

Pájený spoj je základním kamenem výroby dnešní elektroniky. Na jeho kvalitě silně závisí trvanlivost a spolehlivost elektronických zařízení. V minulosti byla používána hlavně eutektická slitina cínu a olova. Postupně z důvodu zákazu používání se přešlo ve výrobě komerční elektroniky na bezolovnaté pájky. Existuje však stále mnoho výjimek, kdy je použití olovnaté pájky povoleno, například zdravotnictví, armáda, letectví a pod.. Ve výrobě se většinou používá jeden druh pájecí slitiny.

Diplomová práce se zabývá zkoumáním vlivu kombinace různých pájecích slitin na pájený spoj. Práce, se vzhledem k zákazu používaní olovnaté pájky, směrnicí WEEE a RoHS v komerční elektronice, zabývá primárně kombinací bezolovnatých pájek a okrajově i kombinací olovnaté a bezolovnaté pájky. Pro bezolovnaté pájky se jedná hlavně o kombinaci nejčastěji používané slitiny SAC a nízkoteplotní slitiny SnBiAg. Smíchání pájek může vzniknout různými způsoby. Může se jednat o opravu zařízení a použití jiné pájky než při výrobě. Ve výrobě může tato situace nastat při použití komponentu, obsahující jinou pájku než jaká je použita při osazování, či například při použití nízkoteplotní pájky pro pájení teplotně náchylných komponent.

Cíle práce

Cílem práce je prostudovat problematiku pájecích slitin a možných rizik při jejich kombinacích. Primárně pro slitiny SnBiAg a SAC. Navrhnout testovací desku plošných spojů a šablony pro dvoustupňový tisk různými poměry pájecích past. Navrhnout a vyzkoušet vhodný technologický postup osazení. Následně navrhnout metodiku pro vyhodnocení odporu spojů a pevnosti spojů. Navrhnout postup pro hodnocení mikrovýbrusů a hodnocení homogenity spoje pomocí optické a elektronové mikroskopie. Ověřit navržený experiment a vyhodnotit dosažené výsledky.

1 Teoretická část studentské práce

1.1 Pájený spoj

Pájení je metalurgické spojování kovů jiným kovem - pájkou. Při kontaktu kovu s roztavenou pájkou dojde k interakci atomů na povrchu pájeného kovu a pájky a vzniku adhezních a kohezních sil. Zároveň dochází k rozpouštění pájeného kovu v pájce a difundování některých prvků spojovaných materiálů. Na rozhraní tak vzniká oblast o určité tloušťce s rozdílnými vlastnostmi než mají prvky do procesu vstupující tzv. intermetalická oblast. Výsledkem je spoj mezi materiály o určitých vlastnostech z hlediska mechanického a elektrického. Pájení dělíme dle teploty tavení pájky na tvrdé a měkké. Pro teploty tavení do 500 °C se hovoří o měkkém pájení a pro teploty vyšší o tvrdém pájení. V elektrotechnice se pro pájení součástek na desku plošných spojů se užívá výhradně měkké pájení.

1.1.1 Požadavky na vlastnosti pájeného spoje

- Mechanická integrita spoje
  - Správný konstrukční návrh spoje
  - Správná volba pájecí slitiny
  - Správný tvar menisků spoje a spoj s minimem dutin
  - Odpovídající pevnost a tažnost spoje
- Tepelné a elektrické vlastnosti spoje
  - Odpovídající elektrický kontakt
  - Odpovídající tepelný kontakt
- Metalurgická stabilita
  - Reakční mechanismy mezi spojovanými kovy a pájkou
  - Sledování reakčních mechanismů v samotné pájce během provozních podmínek
- Environmentální trvanlivost
  - Odolnost vůči korozi
  - Odolnost vůči oxidaci spoje
- Kompatibilita se statutárními požadavky
- Estetické požadavky [3]

1.2 Pájecí slitiny v elektrotechnice

1.2.1 SnPb

Dříve nejrozšířenější pájecí slitina, dnes však již v komerční produkci zakázaná. Jedná se o slitinu cínu a olova v poměru 60 - 63 % cínu a 37 - 40 % olova. Teplota tavení je 83 - 189 °C vyhovující většině používaným technologiím. Výsledný pájený spoj vykazuje velmi dobré vlastnosti z hlediska mechanického, elektrického i tepelného kontaktu. V pájeném spoji se ve větším množství nevytváří křehké intermetalické oblasti. Díky dobré smáčivosti stačí ke kvalitnímu spoji použití málo aktivních tavidel. Výhodná je i z hlediska ceny, jak slitiny tak i potřebných tavidel a technologie. Při poměru 63/35 Sn/Pb je slitina eutektická. Při ochlazování přechází velmi rychle z tekutého stavu do pevného a nevznikají tak velké krystaly jednotlivých složek pájky. V některých případech se do slitiny přidává malé množství stříbra nebo mědi. Příměs stříbra zvyšuje pevnost spoje a brání rozpouštění stříbra v pájce. Příměs mědi brání rozpouštění mědi v pájce a doporučuje se pro pájení měděných lanek.

1.2.2 Bezolovnaté pájky

Pájek bez obsahu olova existuje velké množství. Základním prvkem je cín a jako příměsi se používají nejčastěji drahé kovy, což se projevuje na ceně pájky. Jako přísady se používá například indium, bismut, zlato, stříbro, antimon, zinek a další. Tyto příměsi ovlivňují charakteristické vlastnosti pájky. V porovnání s olovnatou pájkou dosahují bezolovnaté slitiny horších smáčecích charakteristik a je nutné použití agresivnějších tavidel. Z technologického hlediska jsou bezolovnaté slitiny agresivnější a více rozpouštějí materiály ze kterých je technologie vyrobena. Jejich užití je tak náročnější a dražší. Pro dosažení lepší smáčivosti bývá nutné pájení v ochranné atmosféře dusíku. [3]

SAC

Nejvíce používanou bezolovnatou pájkou jsou slitiny cínu, stříbra a mědi (SnAgCu) - SAC. Obsah příměsí se pohybuje v rozsahu 3 - 4,1 % Ag a 0,45 - 0,9 % Cu. Označení odpovídá množství příměsí. Nejčastější SAC 305 má 3 % Ag a 0,5 % Cu. Teplota tavení se pohybuje v rozmezí 217 - 219 °C. [4]

SN100C

SN100C je slitina cínu, mědi a niklu. Množství Cu je 0,7 % a Ni 0,05 %. Teplota tavení 227 °C. Nikl výrazně zvyšuje tekutost, snižuje erozi nerezových dílů a zlepšuje

vzhled spoje. Oproti SAC pájce je levnější a spoje jsou pevnější. Proto se často používaná při pájení vlnou. [4]

Sn3,5Ag

Eutektická slitina cínu a stříbra. Obsah stříbra je 3,5 % Teplota tavení 221 °C. V ochranné atmosféře dusíku má dobrou smáčivost. Při přetavení silně rozpouští měď.[5]

Sn-0,7Cu

Slitina cínu s 0,7 % Cu. Jedná se o eutektickou slitinu s teplotou tání 227 °C. Doporučovaná je pro pájení vlnou. Požadovanou smáčivost dosahuje v ochranné dusíkové atmosféře. Jedná se o nejlevnější bezolovnatou pájku. Má nižší mez kluzu a pevnost v tahu než pájka Sn63-Pb37, je to způsobeno obsahem velkého množství můstků v pájeném spoji. Často je používaná pro povrchovou úpravu vývodů součástek. [5]

Sn-5Sb

Bod tání 232 - 240 °C. Pro dosažení přijatelného smáčení vyžaduje podstatně vyšší pracovní teplotu (cca 290 °C), což výrazně limituje použití této pájky. Další omezující faktor je mírná toxicita antimonu. [5]

Sn-9Zn

Slitina cínu a 9 % zinku. Vzhledem k ostatní pájkám má nízkou teplotu tání 199 °C. Výhoda nižšího teplotního namáhání desky a součástek a také úspory energie. Její značná nevýhoda je náchylnost k oxidaci a korozi. Oxidace způsobuje špatné smáčení při pájení v normální atmosféře. Proto je nutné provádět proces v ochranné atmosféře. Zinek zvyšuje křehkost pájky a reaguje s kyselými a zásaditými produkty vzniklými při pájení. Je tedy nutné zvolit vhodné tavidlo. Náchylnost ke korozi značně snižuje využitelnost této pájky. [5]

Sn-58Bi

Eutektická slitina s teplotou tání 138 °C. Díky své nízké teplotě přetavení se používá pro pájení teplotně náchylných součástí. Není však vhodná do zařízení, kde se mohou vyskytovat vyšší teploty. Má lepší odolnost vůči únavě materiálu než Sn63-Pb37 pájka. Japonskými výrobci součástek používaná pro povrchovou úpravu vývodů. Problém je v případě kontaminace olovem, kdy dochází ke vzniku slitiny s velmi nízkou teplotou tání - 96 °C. [5]

SnBiAg

Slitina cínu, stříbra a bismutu. Bismut obsažený v pájce snižuje povrchovou energii a tím zlepšuje její smáčivost.

Je-li v pájce bismut zastoupen do 1 %, pak jsou atomy bismutu zachyceny v krystalové mřížce cínu. Je-li obsah bismutu vyšší, dochází k vytváření nezávislé druhé fáze. Pokud je bismut zastoupen v množství překračující 5 %, výrazně se sníží tvárnost celé pájky.

Do této skupiny pájek patří Sn-3,3Ag-4,7Bi s teplotou tavení 219 - 220 °C a Sn-3,5Ag-1Bi s teplotou tavení 210 - 215 °C. [5]

Existuje mnoho dalších méně často používaných bezolovnatých slitin, ať již s jiným poměrem příměsí či jejich jinou kombinací.

1.2.3 Směs pájek

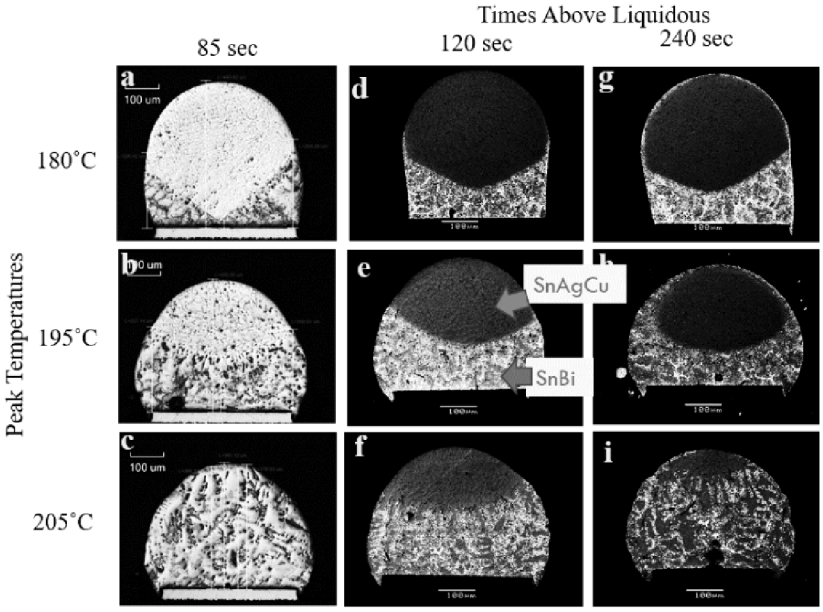
V případě, kdy dojde ke kombinaci pájek záleží na teplotě přetavení jakým způsobem se spoj zformuje. Pokud je teplota přetavení dostatečně vysoká po dostatečně dlouhou dobu, dojde k promíchání pájek. V případě nižší teploty či času dochází k různé hloubce promíchání až do situace, kdy nedojde k roztavení pájky s vyšší teplotou vůbec. Příklad závislosti tvorby spoje na teplotním profilu je na Obr. 1.1 [7]. Na přechodu mezi pájkami zároveň dochází k difuzi, která může pokračovat po celou dobu života spoje. Zároveň také při průchodu proudu spojem dochází k elektromigraci. Dle [8] docházelo k významné migraci atomů Bi v kombinaci SnBiAg a SAC ve směru proudu.

1.3 Pájení přetavením

Pájení přetavením je způsob pájení součástek, kdy na desku plošných spojů je nanesena pasta ze směsi sférické slitiny pájky definovaných rozsahů rozměrů a tavidla. Do pasty jsou osazeny součástky a následně je celá sestava zahřáta v peci, kde dojde k přetavení pasty. Ohřev probíhá podle stanoveného teplotního profilu. Příklad teplotního profilu je na Obr. 1.2.

1.4 Defekty pájení

Defekty při procesu pájení mohou vzniknout ve všech fázích procesu. Procesními defekty, jako například zkraty mezi sousedními vývody, vzniklé velkým množstvím pájky, či špatně umístěné součástky se tato práce nezabývá. Tato práce se zabývá



Obr. 1.1: Příklad kombinace SnBiAg a SAC pájky. Závislost formování spoje na teplotním profilu přetavení. [7]

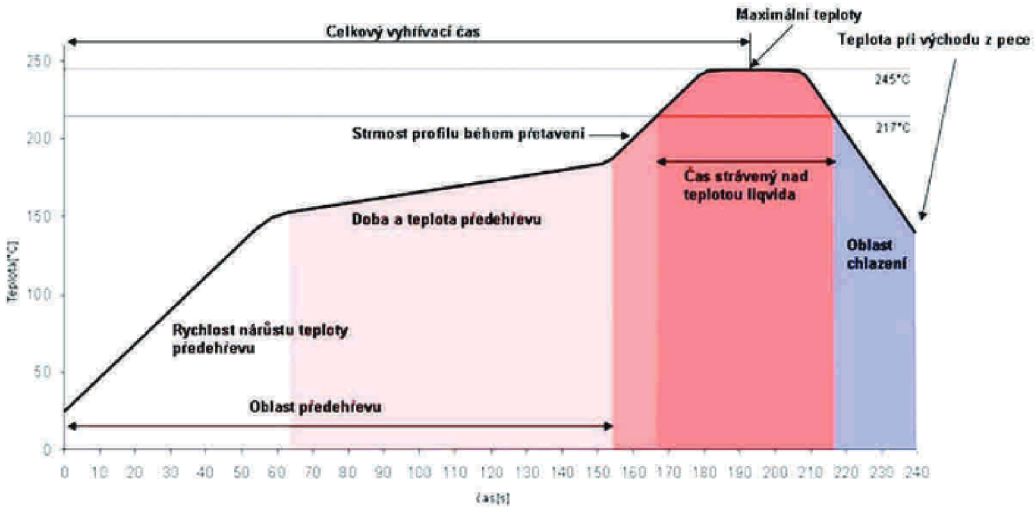
defekty spoje vzniklými nekompatibilitou povrchů a pájek. Mohou vzniknout a projevit se při vzniku spoje, či se mohou projevit až časem při provozu. Například tepelným namáháním nebo mechanickým či chemickým.

1.4.1 Tvorba dutin ve spoji

Dutiny ve spoji tzv. voids vznikají těkavými látkami které nedokáží uniknout ze spoje před jeho ztuhnutím. Velké množství pórů ve spoji snižuje jeho pevnost i tepelnou a elektrickou vodivost. Z dlouhodobého hlediska takový spoj představuje problém z hlediska tepelného a mechanického namáhání. Tento problém se vyskytuje nejčastěji u spojů součástek s vývody typu "gull wing" či u BGA pouzder. Odhaleny mohou být například rentgenovými snímky 1.3. [4]

1.4.2 Odvzlínání

Při pájení pájka odvzlíná ze spoje, například na pájený vývod součástky a nespojí se s deskou. Bývá zapříčiněno horší pájitelností jednoho z povrchů, například z důvodu znečištění či nekompatibilitou pájky. Další možností je rozdílná teplota vývodu a pájecí plochy. Rozdílná teplota značí nevhodný teplotní profil přetavení či přílišnou tepelnou kapacitu desky, kdy pájecí plochy nejsou dostatečně tepelně izolovány od větších měděných ploch.



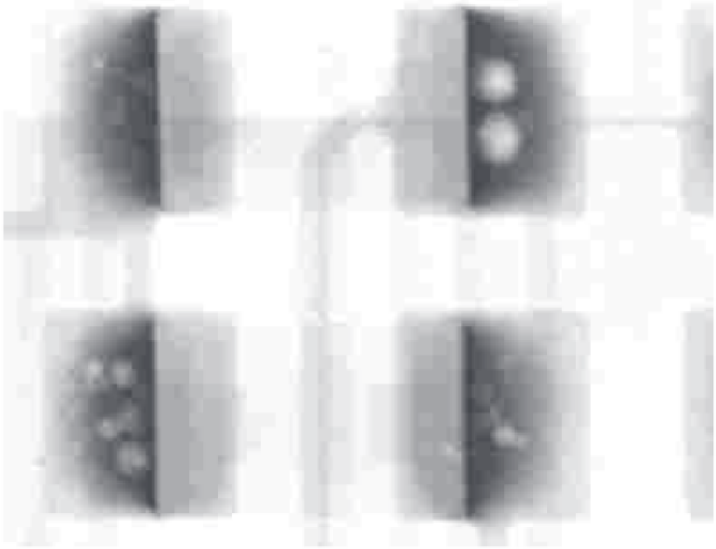
Obr. 1.2: Příklad profilu přetavení. [5]

1.4.3 Zvedání součástek

Zvednutí jednoho konce součástky z pájecí pasty tzv. "tombstoning". Vzniká z důvodu nevyváženosti smáčecích sil mezi vývody součástek během přetavení. Může být způsobeno drobnými rozdíly v pájitelnosti vývodů či rozdílným časem, kdy dojde k tavení pájky. Ke vzniku tohoto defektu přispívá přítomnost dusíkové atmosféry, naopak přidání kyslíku do ochranné atmosféry pravděpodobnost snižuje, avšak za cenu celkově horší smáčivosti. Fotografie tohoto defektu je na Obr. 1.4. [4]

1.4.4 Praskliny ve spoji

Praskliny ve spoji jsou odvislé od struktury a pevnosti slitiny spoje. Mohou vzniknout při výrobě mechanickým či tepelným namáháním po přetavení pájky nebo se mohou objevit až při provozu. Důvodů ke vzniku prasklin může být více a záleží v jakém místě spoje vznikla a jak se spojem šířila. Příčinou vzniku může být křehká intermetalická vrstva či může prasklina vzniknout na dutině apod. Následně pak záleží zda se prasklina rozšíří na celý spoj či zbytek spoje zůstane vcelku. To záleží na mechanických vlastnostech a krystalické struktuře pájky. Příklad praskliny spoje je na Obr. 1.5. [4]

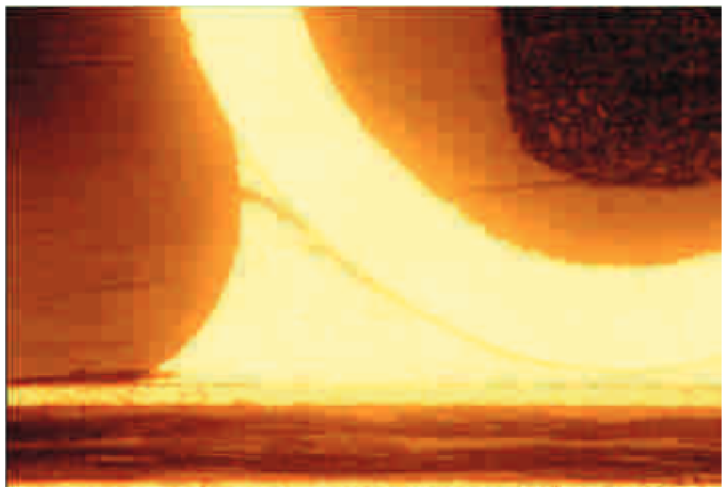


Obr. 1.3: RTG snímek spojů s dutinami. [4]

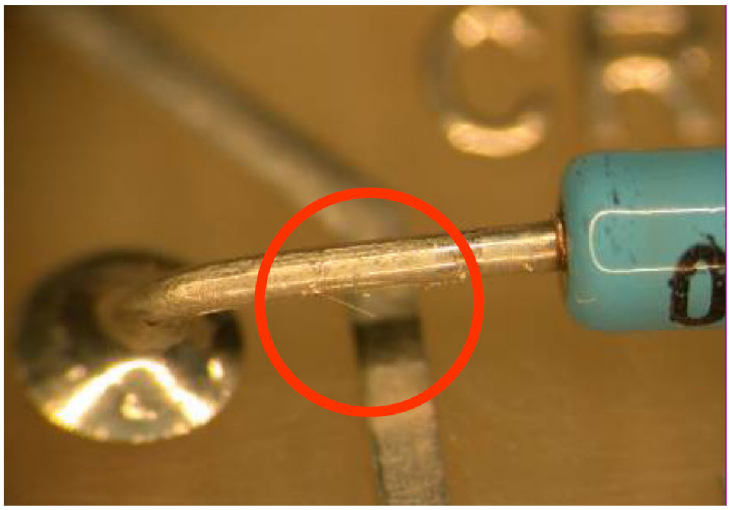
Obr. 1.4: Příklad zvednutí součástky. [4]

1.4.5 Cínové whiskery

Cínové whiskery jsou tenká vlákna rostoucí z povrchu pájených spojů s vysokým obsahem cínu a malým množstvím příměsí. Jejich růst závisí na okolním prostředí, vlhkosti, mechanickému a elektrickému namáhání. Mohou způsobovat po čase zkraty mezi vývody součástek. Příklad je na Obr. 1.6 [3]



Obr. 1.5: Příklad praskliny spoje. [4]



Obr. 1.6: Příklad cínových whiskerů. [6]

1.4.6 Cínový mor

Při teplotách pod 13 °C přechází čistý cín nebo cín s malým množstvím příměsí alotropní transformací z beta-Sn (bílý cín) na alfa-Sn (šedý cín), tj. u cínu probíhá změna struktury z mřížky tetragonální prostorově centrované na kubickou s diamantovou strukturou. Ta se vyznačuje zvětšením objemu o 26 %. Změna začíná na povrchu a prostupuje dovnitř spoje. Vede k dezintegraci spoje a změně jeho vlastností.

1.4.7 Intermetalické vrstvy

Roztavená pájka působí na pájecí plošku jako agresivní rozpouštědlo. Na přechodu mezi pájkou a pájeným povrchem tak vznikají intermetalické sloučeniny. Po ztuhnutí spoje pak dále dochází k difuzi atomů z jednoho prostředí do druhého a vrstva intermetalických sloučenin se neustále zvětšuje. Difúzní procesy záleží na nepravidelnosti krystalové mřížky a počtu poruch. Dále pak na teplotě a proudové zátěži.

V pájených spojích v elektrotechnice vznikají nejčastěji intermetalické sloučeniny Cu a Sn a dále pak například Sn a Ni. Vlastnosti nejčastějších jsou v tabulce 1.1.

Tab. 1.1: Vlastnosti intermetalických sloučenin. [4]

Vlastnost		$\mathbf{Cu_6Sn_5}$	$\mathbf{Cu_3Sn}$	$\mathbf{Ni_3Sn_4}$	**Cu**
Tvrdost podle Vickerse	$kg.mm^{-2}$	378 (+/- 55)	343 (+/- 47)	365 (+/- 7)	50
Mechanický charakter		Křehký	Křehký	Křehký	Kujný
Tepelná roztažnost	$ppm.K^{-1}$	16,3	19,0	13,	16
Tepelná vodivost	$W.K^{-1}.m^{-1}$	34,1	70,4	19,6	385
Rezistivita	Ω .cm	17,5	8,93	28,5	1,7
Hustota	$g.cm^{-3}$	8,3	8,9	8,65	8,9

2 Návrh a příprava experimentu

Cílem experimentu je vyhodnocení vlastností pájeného spoje, kdy došlo ke kombinaci různých pájecích slitin. Sledovanými vlastnostmi jsou elektrický odpor, pevnost, struktura a spolehlivost spoje. K provedení experimentu je potřeba testovací DPS (desky plošných spojů), na které je možné tyto vlastnosti zjišťovat. Tato DPS musí být osazena s definovaným poměrem pájecích slitin. Posledním krokem je vyhodnocení vlastností spoje. To obsahuje měření odporu spojů, jejich pevnosti a spolehlivosti.

2.1 Návrh DPS

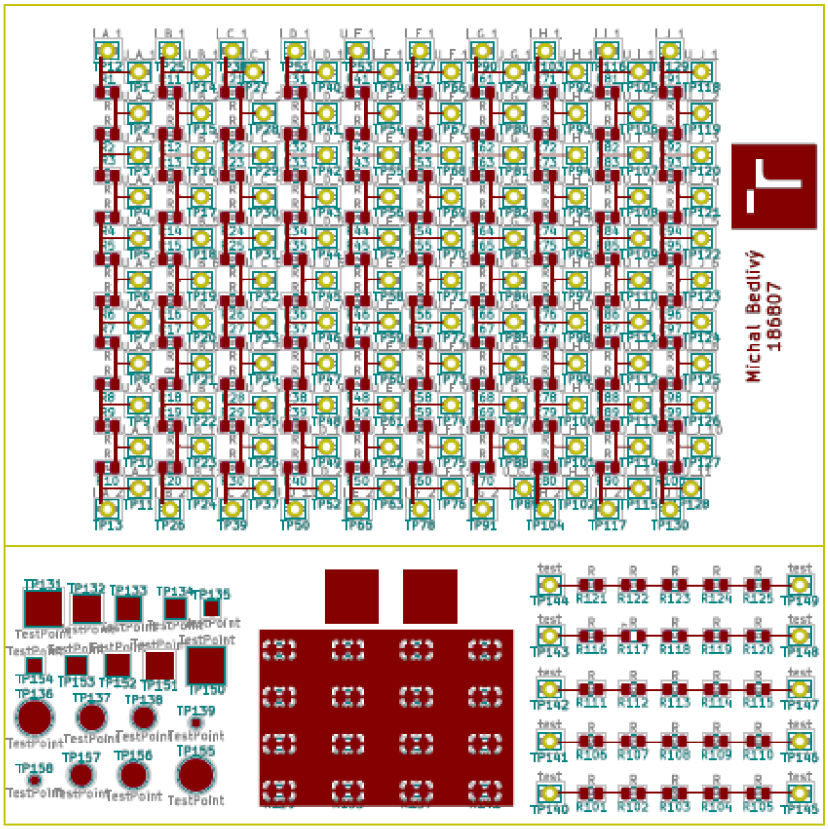
Návrh testovací DPS je rozdělen do několika částí. První část je určena pro měření odporu pájeného spoje, tato část zabírá největší část desky. Ve zbylé části desky jsou umístěny součástky pro testování spoje na pevnost, část určená pro vytvoření mikrovýbrusů a část s testovacími plochami. Deska je určena pro osazení jako celek a je navržena tak, aby následně bylo snadné oddělit jednotlivé části a pracovat s nimi odděleně. Obr. 2.1

2.1.1 Měření odporu pájených spojů

Měření odporu pájených spojů je realizováno na testovací desce osazené SMD odpory o velikosti 0 Ω v pouzdře 0805. Na desce je umístěno 10 skupin, kdy v každé skupině je 10 sériově spojených odporů. Každá skupina má vyvedené testovací body pro čtyřvodičové či můstkové měření odporu celého sériového řetězce a také testovací bod vyvedený z každého spoje mezi odpory, pro případné měření konkrétních jednotlivých spojů. Obr. 2.2

2.1.2 Mikrovýbrusy

Součástky určené pro tvorbu mikrovýbrusů jsou umístěny v rohu desky. Je zde umístěno 25 SMD odporů v pouzdře 0805, pro samotné mikrovýbrusy nezáleží na osazené hodnotě odporu, ale vzhledem k testu odporu spojů je použito stejné hodnoty a to 0 Ω. Odpory jsou spojeny do série po 5 kusech, kdy konce jsou vyvedeny na testovací body. Zapojení odporů zde není důležité, ale umožní orientační kontrolu, zda v daném řetězci není například studený spoj, na který by pak bylo vhodné se zaměřit. Schéma zapojení je na Obr. 2.3.



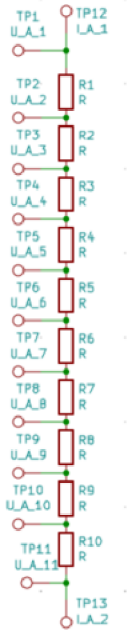
Obr. 2.1: Testovací DPS.

2.1.3 Měření pevnosti pájeného spoje

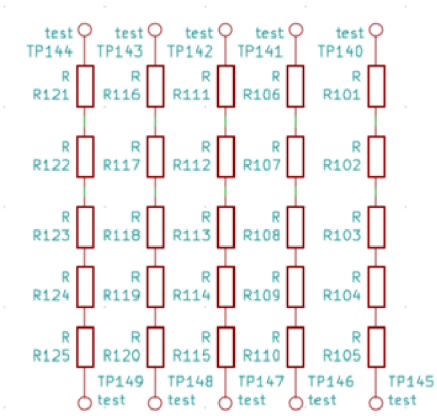
Pro měření pevnosti pájeného spoje je určeno 16 SMD rezistorů v pouzdře 0805. Stejně jako v případě mikrovýbrusů zde nezáleží na hodnotě odporu, ale jsou použity stejné odpory o hodnotě 0 Ω. Odpory jsou připojeny oběma vývody na polygon umístěný pod nimi. Pájecí plochy jsou od polygonu odděleny tepelně pomocí "thermal spikes". Obr. 2.4 Nejsou tedy k polygonu připojeny celou plochou, ale pouze tenkými cestami. Tento způsob, by oproti tomu, pokud by pájecí plochy nebyly spojeny s žádnou další měděnou plochou na desce, měl zajistit vyšší pevnost pájecí plochy vůči zbytku desky, aby při trhací zkoušce nedocházelo k odtržení celé plochy od desky. Oproti tepelně neizolovanému napojení na polygon by však neměl narušovat proces přetavení přílišným odvodem tepla do mědi polygonu.

2.1.4 Testovací plochy

Poslední částí desky jsou testovací plochy. Na desce je umístěno celkem 18 testovacích ploch. 5 různých velikostí čtvercového tvaru plochy a 4 velikosti kruhového tvaru.

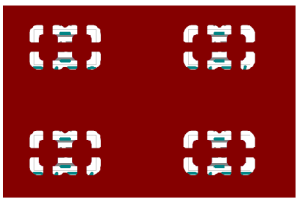


Obr. 2.2: Schéma zapojení jedné skupiny testovacích odporů.

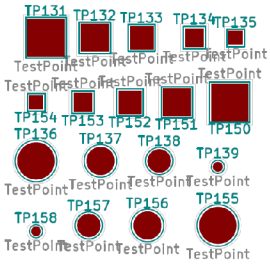


Obr. 2.3: Schéma zapojení odporů pro mikrovýbrusy.

Všechny jsou na desce umístěny dvakrát. 2.5



Obr. 2.4: Tepelné oddělení pájecích ploch.



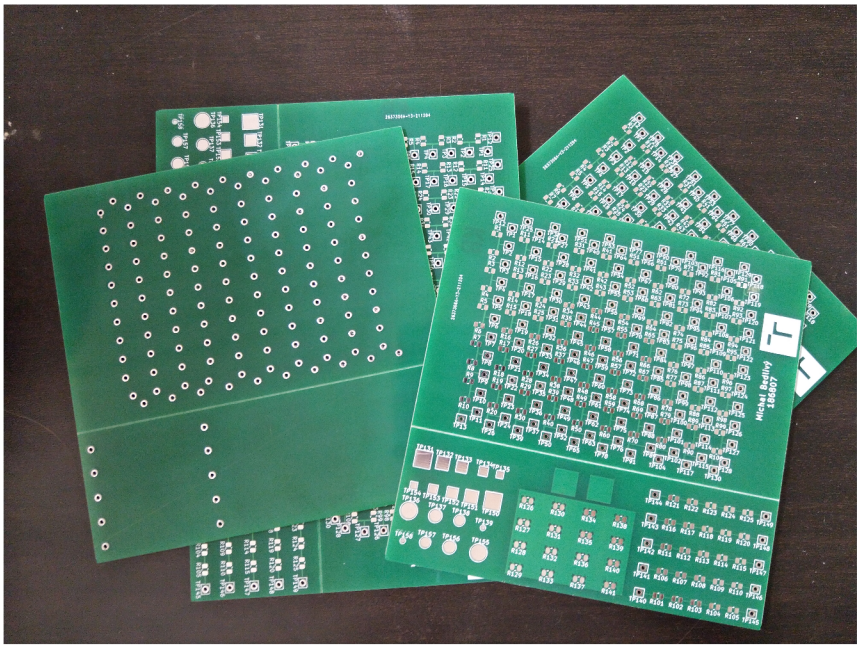
Obr. 2.5: Detail části desky s testovacími plochami.

2.1.5 Výroba DPS

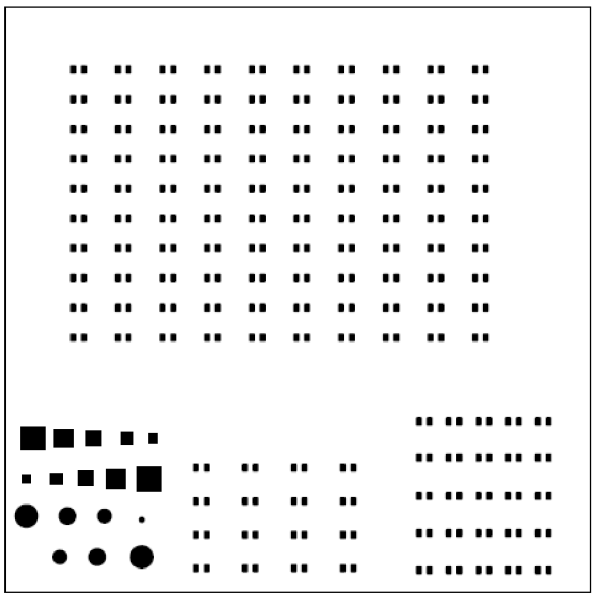
Desky byly zadány do výroby u firem JLCPCB a ALLPCB. Vyrobeno bylo celkem 20 kusů. Obr. 2.6 15 ks s povrchovou úpravou bezolovnatým HASL a 5 ks olovnatým HASL. V případě rozšíření experimentu mohou být objednány desky s jinou povrchovou úpravou. Volba by padla pravděpodobně na povrchovou úpravu OSP (Organic Surface Protectives), imerzním cínem či ENIG. Ty by byly vhodné hlavně pro jejich pravděpodobně menší vliv na sledovaný proces.

2.1.6 Výroba šablony pro tisk pasty

Šablony pro tisk pasty byly vyrobeny leptáním s přenosem motivu fotocestou. Jako základní materiál byly zvoleny bronzové fólie o dvou tloušťkách 100 a 150 µm. Motiv šablony viz Obr. 2.7 byl natištěn na průhlednou fólii vedle sebe v přímém a zrcadlově otočeném obrazu tak, aby při přeložení fólie bylo možné přenést motiv fotocestou na obě strany bronzové fólie a leptání tak probíhalo z obou stran. Celkem byly vyrobeny tři šablony s rozdílnými parametry. Dvě s tloušťkou 100 µm, jedna se 100 % pokrytím padů a druhá s otvory zmenšenými relativně o 10 %. Třetí šablona s tloušťkou 150 µm a 100 % pokrytím padů. Rozměry byly zvoleny dle dostupného materiálu a požadovaných množství nanesené pájecí pasty. Postup volby velikosti použitých šablon je popsán v dalších kapitolách.



Obr. 2.6: Vyrobené DPS.



Obr. 2.7: Předloha pro šablonu na tisk pasty.

Tab. 2.1: Tabulka obsahu a objemu okna šablony.

šablona	a [mm]	b [mm]	h [mm]	S [mm^2]	V [mm^3]
100u -10%	1,12	0,84	0,1	0,9408	0,084
100u	1,4	1,02	0,1	1,428	0,102
150u	1,4	1,02	0,15	1,428	0,153

2.1.7 Výpočet objemu nanesené pasty a složení výsledné pájky.

Výpočet obsahu a objemu okna šablony:

$$S = a.b \tag{2.1}$$

$$V = S.h \tag{2.2}$$

Kde a,b jsou velikosti okna šablony a h je tloušťka šablony. Výsledky v tabulce 2.3.

Objem pasty po nanesení v ideálním případě, pokud nedojde k chybám při tisku, odpovídá objemu okna. To platí pro první tisk pasty. Pro druhý tisk pasty se musí počítat s objemem přetavené pájky po prvním tisku. Obecně lze zjednodušeně počítat objem pájky po přetavení jako 50 % objemu nanesené pasty. Objem druhé pasty je tedy objem okna šablony mínus polovina objemu první pasty. Objem druhé pájky po přetavení je polovinou tohoto objemu. Zvolená varianta s objemovým poměrem 1:1 je výhodná pro test z důvodu stejného složení slitiny nezávisle pořadí použitých past. Pro jiné poměry by bylo nutné vyrobit šablony o dalších velikostech a párovat je dle použitých slitin a pořadí. Výsledná slitina v případě plného prodifundování je Sn67Bi31,4Ag1,4Cu0,2. Dle 2.8 má tato slitina teplotu tavení 176 °C.

Přepočet objemového poměru na hmotností je proveden přes hustoty pájek dle rovnice 2.3.

$$\rho_{SAC305} = 7,39 g/cm^3$$

$$\rho_{Sn42Bi58} = 8,72 g/cm^3$$

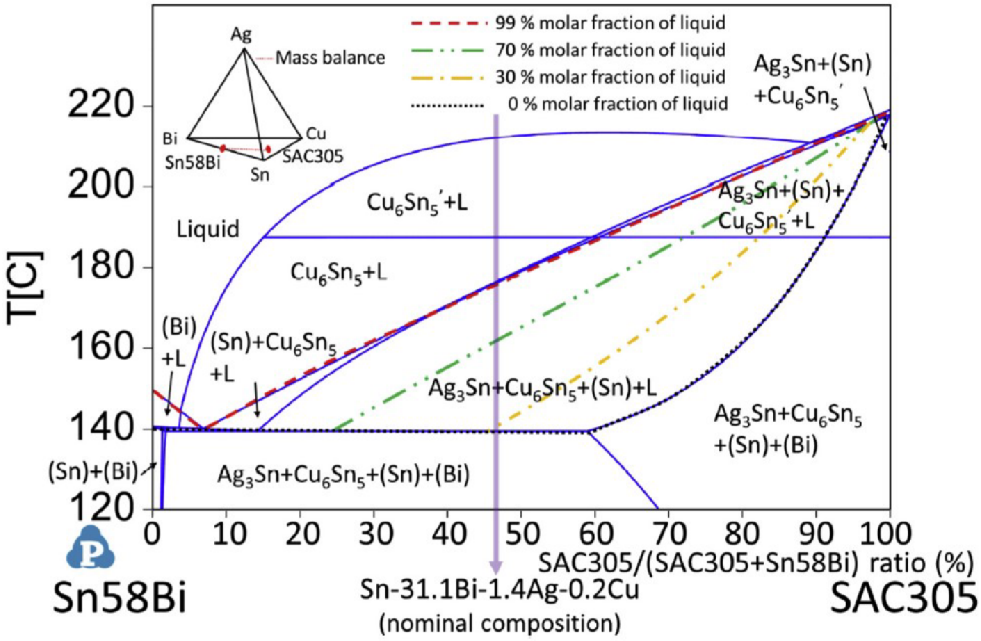
$$m_{pájka1} = V_{pájka2}.\frac{\rho_{pajka1}}{\rho_{pajka1} + \rho_{pajka2}} \tag{2.3}$$

2.2 Technologický postup osazení

Pro osazení kombinací slitin bylo zvoleno dvoustupňové nanášení pasty s postupným přetavením. Po nanesení první vrstvy projde deska procesem přetavení v peci a následně bude nanesena druhá vrstva pájky a do ní budou osazeny součástky a deska projde znovu přetavením. Požadovaného množství pájek bude dosaženo použitím šablon s různou tloušťkou.

Tab. 2.2: Tabulka výpočtu množství a poměrů pasty.

šablona 1	šablona 2	V_{pasta1}	$V_{pájaka1}$	V_{pasta2}	V_{pajka2}	$V_{pájaka1}$:V_{pajka2}
100u	100u	0,102	0,051	0,051	0,0255	2:1
100u	150u	0,102	0,051	0,102	0,051	1:1
100u -10%	100u	0,084	0,042	0,06	0,03	1,4:1
100u -10%	150u	0,084	0,042	0,111	0,0555	1:1,32



Obr. 2.8: Závislost teploty tavení na poměru pájek SAC305 a Sn42Bi58 [10]

Tab. 2.3: Tabulka hmotnostního poměru a výsledný poměr jednotlivých složek.

	SAC305:Sn42Bi58				Sn42Bi58:SAC305			
Vpájaka1:Vpájaka2	2:1	1:1	1,4:1	1:1,32	2:1	1:1	1,4:1	1:1,32
$m_{pájaka1}$:$m_{pájka2}$	1,69:1	1:1,18	1,12:1	1:1,56	2,53:1	1,18:1	1,65:1	1:1,12
Slitina	Sn76,2 Bi21,6 Ag1,9 Cu0,3	Sn67 Bi31,4 Ag1,4 Cu0,2	Sn70,8 Bi27,4 Ag1,6 Cu0,3	Sn69,3 Bi29 Ag1,5 Cu0,3	Sn57,4 Bi41,6 Ag0,8 Cu0,1	Sn67 Bi31,4 Ag1,4 Cu0,2	Sn62,6 Bi36,1 Ag1,1 Cu0,2	Sn70,8 Bi27,4 Ag1,6 Cu0,3

Teplotní profil přetavení první vrstvy je daný použitou pájecí pastou první vrstvy. Při druhém přetavení již budou přetavovány různé slitiny a teplotní profil již tedy není daný a jeho volba bude součástí experimentu. Zde záleží na teplotě tavení použitých pájek a jejich pořadí. V jednom případě bude reagovat pájka s nižší teplotou tavení s již přetavenou pájkou s vyšší teplotou tavení, kdy bude docházet k difúzi mezi nimi případně až do stavu, kdy dojde k roztavení obou pájek a jejich mísení.

V opačném případě bude nepřetavená pasta pájky s vyšší teplotou reagovat s roztavenou pájkou s nižší teplotou tavení. Částečky pájky z pasty tak budou reagovat s roztavenou druhou slitinou a postupně se v ní rozpouštět a měnit tak její vlastnosti. Dle teplotního profilu buď dojde k přetavení veškeré pájky či se zvýší teplota tavení celku a nedojde tak k plnému přetavení.

2.3 Měření odporu

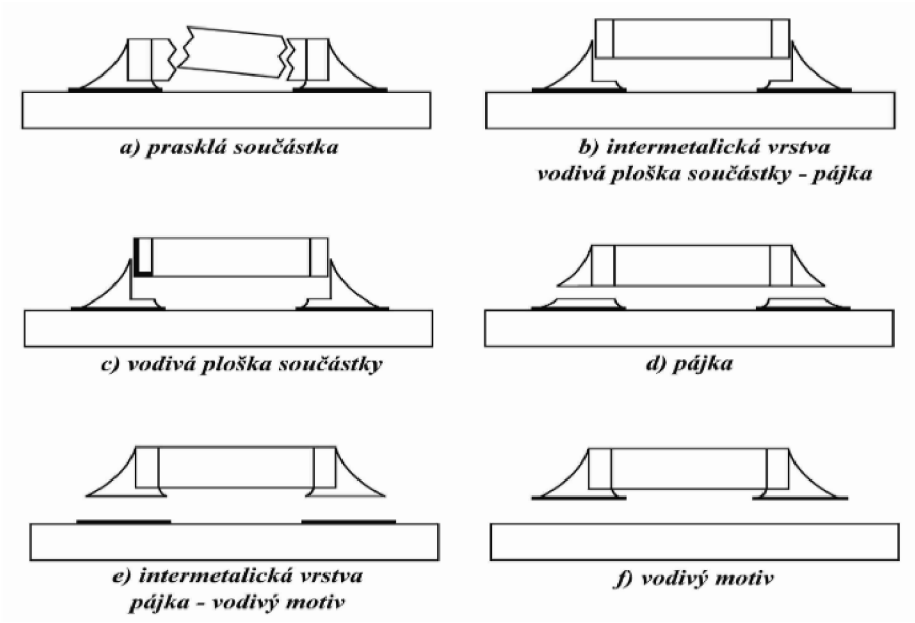
Pro měření odporu bylo zvoleno čtyřvodičové měření pro eliminaci odporu přívodních vodičů a spojů. Na každé desce bude změřen odpor všech 10 skupin sériových odporů. V případě velkých odchylek u jednotlivých měření bude provedeno měření na jednotlivých odporech. Průměrná hodnota a rozptyl hodnot bude porovnáván mezi jednotlivými deskami. Následně budou desky umístěny do komory pro zrychlené stárnutí a v daných intervalech se bude měření opakovat.

2.4 Zkouška pevnosti

Metodikou testování pevnosti pájených spojů se zabývá norma ČSN EN62137–1–(1–5). Spoj je možné testovat na vibrace, tah, střih, krut, ohyb apod. Pro účely porovnání v této práci je zvoleno testování na střih, které je vhodné pro použité SMD součástky. V tomto testu se měří síla působící do boku součástky potřebná pro odtržení součástky z desky. Tato síla je odvislá od použité pájky, množství a velikosti trhlin, které se vytvoří při přetavení spoje. [1] Testování se bude provádět u desek před a po procesu zrychleného stárnutí. Vyhodnocovat se bude síla při které dojde k utržení a místo ve kterém k utržení dojde Obr. 2.9.

2.5 Zrychlené stárnutí

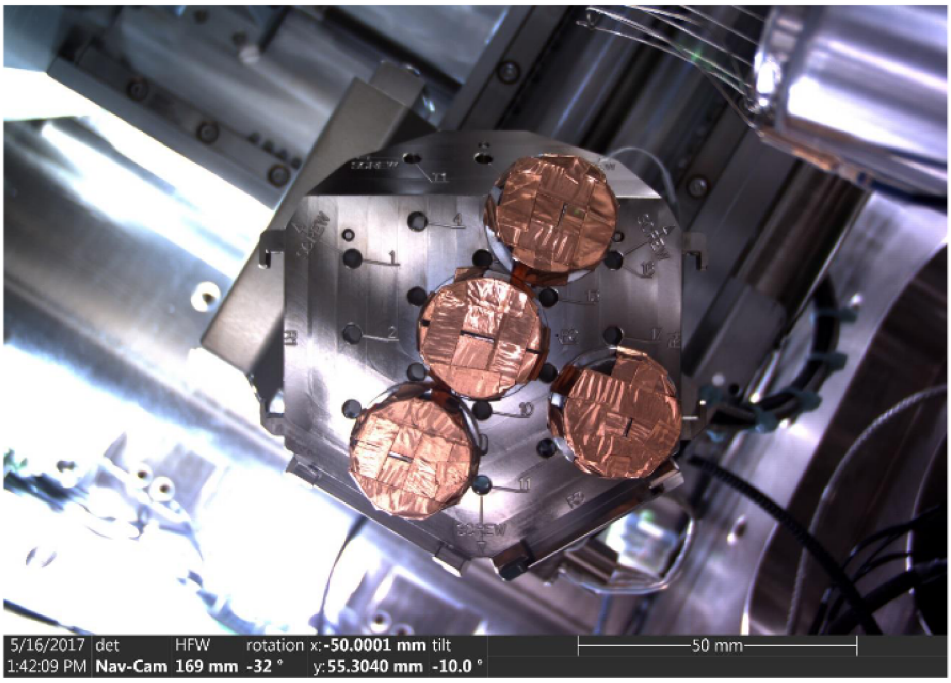
Pro zjištění trvanlivosti spoje bude provedeno zrychlené stárnutí vzorků pomocí teplotního cyklování v teplotní komoře. Teplotní profil cyklování bude volen dle možností dané komory. Maximální teplota bude volena pod 100 °C. Počet cyklů a délka testování se bude odvíjet od výkonu teplotní komory. U desek bude v průběhu stárnutí po určitých intervalech měřen odpor. Po ukončení stárnutí budou provedeny testy pevnosti a vyhotoveny mikrovýbrusy.



Obr. 2.9: Místo utržení součástky při testu střihem.

2.6 Mikrovýbrusy

Z testovacích vzorků budou vyhotoveny mikrovýbrusy ze kterých bude následně analyzována kvalita spoje. K analýze bude využito optické a elektronové mikroskopie. Pomocí mikrovýbrusů lze pozorovat intermetalické oblasti, trhliny a bubliny ve spoji. Pro analýzu pomocí mikrovýbrusu je nejdůležitější jeho příprava. Pro optickou mikroskopii je nejdůležitější kvalita leštění vzorku. Pro zvýraznění struktury je možné na vzorek použít vhodný mikrolept. Pro elektronovou mikroskopii je příprava vzorku složitější. Vzhledem k nutnosti vakuování komory mikroskopu jsou problematické případné vzduchové bubliny v zalévací hmotě. Proto je nutné při přípravě zalévací hmoty míchat jemně tak, aby se do ní dostalo co nejméně vzduchových bublin. Dalším problémem při pozorování skenovacím elektronovým mikroskopem je nabíjení vzorku. K nabíjení je nejvíce náchylná právě zalévací hmota. Tomu lze zabránit například vymaskováním kovovou lepící fólií viz. Obr. 2.10. Případně obsahem vodních par v komoře. V opačném případě dochází k nabíjení vzorku což znemožňuje další pozorování a je nutné vzorek vybít, což znamená zaplnit komoru vzduchem a pro další pozorování znovu vakuovat. [2]



Obr. 2.10: Příklad přípravy mikrovýbrusu pro SEM.[2]

3 Průběh experimentu

3.1 Prvotní ověření postupu experimentu

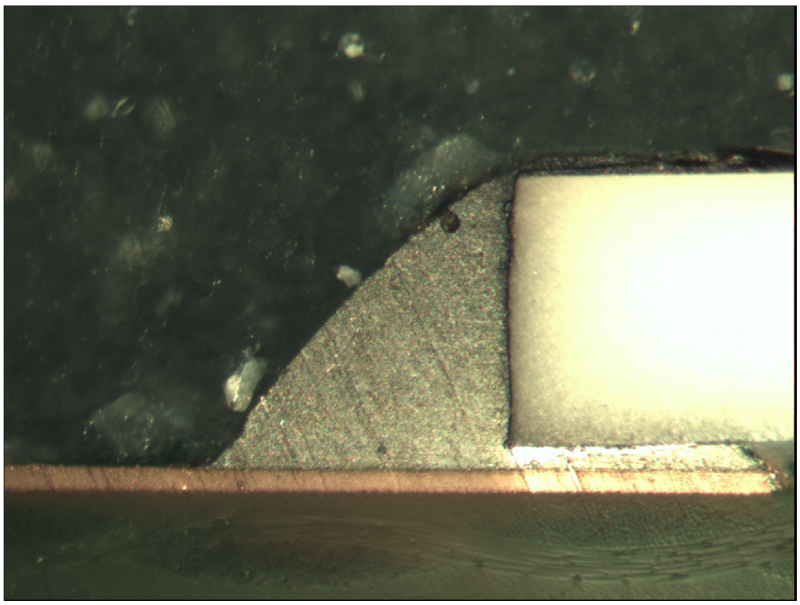
Pro ověření navrhnutého postupu experimentu byly všechny kroky experimentu nejprve ověřeny na jedné DPS. Pro ověření byla nejprve vyrobena první šablona pro tisk pasty a to z fólie o tloušťce 100 µm a 100 % pokrytí padu. Přes tuto šablonu byla nanesena pasta SAC305 na testovací DPS. Testovací DPS byla vložena do pece na přetavení. Pec byla nastavena pouze orientačně tak aby došlo s jistotou k přetavení, ale profil neodpovídal profilu předepsanému výrobcem.

Následně byl proveden pokus o srovnání pájky ve stolním hydraulickém lisu. Z výsledků však bylo patrné že tento postup nebude vhodný. Z důvodu drobných nerovností a nerovnoběžností ploch lisu a tím nekonstantnímu rozložení síly mezi jednotlivé plochy pájky se při lisování nedařilo dospět ke konstantnímu slisovaní pájky po celé ploše desky, což by mohlo zanést nekonzistentnost do experimentu. Následně se vyzkoušelo nanesení nízkoteplotní SnBi pájecí pasty přes stejnou šablonu přes jakou byla nanesena první pasta. Po tisku pasty v místech, které byly dostatečně zalisované bylo správné množství pasty. Avšak v místech, kde nedošlo ke slisování téměř vůbec bylo naneseno malé množství pasty.

Z tohoto testu vyšlo několik možností dalšího postupu a proto byly vyrobeny další dvě šablony, jedna o tloušťce 150 µm pro větši množství pasty nanesené při nanášení druhé pasty. A druhá o tloušťce 100 µm se zmenšenými otvory pro tisk pasty, pro nanesení menšího množství při prvním tisku pasty.

Po nanesení druhé pasty na testovací desku byla částečně osazena nulovými odpory a vložena do pece k druhému přetavení. Pec byla nastavena přibližně na profil pro SnBi pájecí pastu. Na testovací desce byly následně vyzkoušeny všechny navržené měření a testy. Bylo otestováno měření odporu, vyzkoušena trhací zkouška a vytvořen testovací mikrovýbrus. Měření odporu vycházelo mezi jednotlivými sériovými řadami konzistentně, stejně tak trhací zkoušky jednotlivých odporů vykazovali malé odchylky.

Oproti očekávání na mikrovýbrusu nebyla pod klasickým mikroskopem viditelná žádná majoritní nekonzistentnost v řezu pájených spojů. V některých spojích byly viditelné poruchy, hlavně voidy a menší trhliny. Jejich množství však nebylo příliš vysoké. Při pozorovaní konfokálním mikroskopem byla viditelná struktura spoje tvořená krystaly Bismutu. Jejich rozložení ve spojích bylo však konzistentní v celé ploše řezu. Prvková analýza pomocí skenovacího elektronového mikroskopu pak potvrdila téměř homogenní rozložení prvků v celém spoji.



Obr. 3.1: Mikrovýbrus testovacího vzorku.

3.2 Testování vlivu postupu osazení a poměru množství pájek

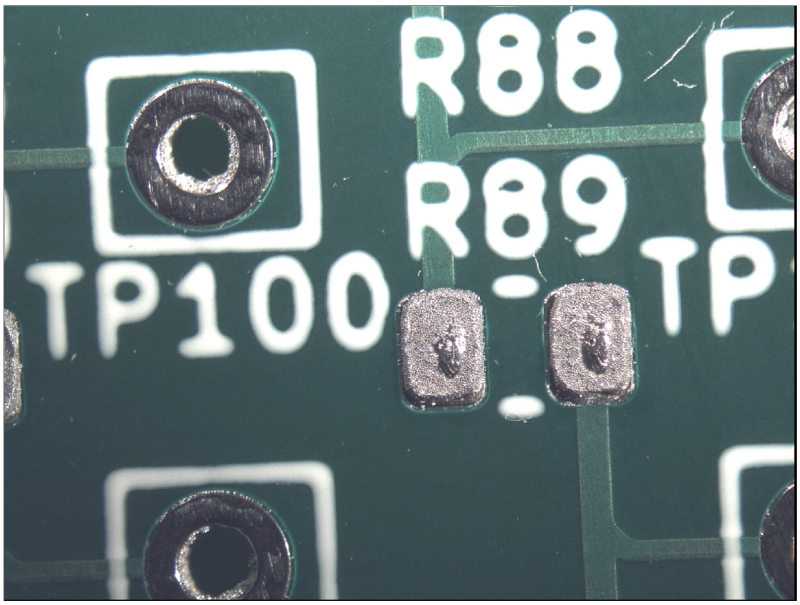
Dalším krokem experimentu bylo odladění způsobu osazování.

3.2.1 Postup osazení

Z prvotního ověření vyplynuly problémy s lisováním a bylo tedy nutné najít alternativní postup. Jednou variantou bylo použití válcového lisu, u kterého by bylo možné dosáhnout konzistentnější síly a tak rovnoměrnějšímu zalisování pájky. Jako druhá varianta byla zvolena možnost vyhnout se lisovaní úplně a druhou vrstvu pájky nanést přímo na první. U této varianty bylo nutné vyřešit množství pájky nanesené při tisku druhé vrstvy. Při použití stejné šablony jako při tisku první vrstvy by při druhém nanášení bylo okno v šabloně téměř z 50 % zaplněné již přetavenou pájkou a vrcholek přetavené pájky dosahoval souběžně s vrchní plochou šablony. Nanesená druhá vrstva by tak byla pouze při okrajích spoje Obr. 3.2. Byly proto vyrobeny další dvě šablony s rozdílnou velikostí.

3.2.2 Teplotní profil přetavení

Pro tento test byly zvoleny teplotní profily dle doporučených profilů od výrobce pájky. Pro nastavení přetavovací pece byly na jednu DPS umístěny termočlánky a



Obr. 3.2: Vrcholek spodní pájky vyčnívající nad pastu.

pomocí loggeru SlimKIC 2000 měřeny teploty v průběhu přetavení. Použitá dvouzónová přetavovací pec DIMA obsahuje tři tepelné zářiče s regulovatelnou teplotou. Jeden pro spodní ohřev desky a dva horní, pro předehřev a pro přetavení. Dále je možné regulovat rychlost dopravníku. Dosáhnout výrobcem doporučeného profilu vzhledem k nízkému počtu nastavitelných zón nebylo přímočaré, ale po mnoha iteracích změny nastavení a opakování měření se podařilo nastavit profily odpovídající doporučení. Veškeré použité profily jsou v přílohách, je u nich vždy uvedeno i nastavení teplot a rychlosti pece. Pro případ rozšíření či ověření experimentu by však bylo nutné profily znovu přeměřit a korigovat. U použité pece má velký vliv teplotní profil i drobná změna okolních podmínek proudění vzduchu, například otevřené okno apod. Dále také aktuální stav pece. V průběhu experimentu byla pec servisována a promazání ventilátoru změnilo výrazně nastavení pece pro požadovaný profil. Teplotní profil byl tedy vždy měřen a nastaven před samotným osazením a v průběhu pak byly udržovány konstantní podmínky.

3.2.3 Osazení a přetavení

Následně bylo osazeno prvních 5 DPS rozdílnými způsoby viz tab. 3.1. Přes zvolené šablony byla na desky 1 - 5 natištěna pasta SAC305. Po nanesení pasty bylo pracoviště a všechny nástroje důkladně očištěny od zbytků pasty, aby nedocházelo ke kontaminaci při další práci. Následně byly postupně desky vloženy do přetavovací pece nastavené na teplotní profil dle doporučení výrobce pro tuto pájku. Po pře-

Tab. 3.1: Tabulka způsobu osazení DPS.

PCB #	První pájka	Šablona 1	Teplotní profil	Válcování	Druhá pájka	Šablona 2	Teplotní profil
1	SAC 305	100µ	280 300 400 v3	ne	Sn42Bi58	100µ	260 220 360 v17
2	SAC 305	100µ	240 270 400 v3	ne	Sn42Bi58	150µ	260 220 360 v17
3	SAC 305	100µ -10%	240 270 400 v3	ne	Sn42Bi58	100µ	260 220 360 v17
4	SAC 305	100µ -10%	240 270 400 v3	ne	Sn42Bi58	150µ	260 220 360 v17
5	SAC 305	100µ	240 270 400 v3	ano	Sn42Bi58	100µ	260 220 360 v17
6	SAC 305	100µ	240 270 400 v3	ne	Sn42Bi58	150µ	260 220 380 v17
7	SAC 305	100µ	240 270 400 v3	ne	Sn42Bi58	150µ	180 240 330 v03
8	SAC 305	100µ	240 270 400 v3	ne	Sn42Bi58	150µ	240 270 400 v3
9	Sn42Bi58	100µ	245 220 350 V17	ne	SAC 305	150µ	260 220 380 v17
10	Sn42Bi58	100µ	245 220 350 V17	ne	SAC 305	150µ	180 240 330 v03
11	Sn42Bi58	100µ	245 220 350 V17	ne	SAC 305	150µ	240 270 400 v3

tavení a vychladnutí byly desky očištěny od tavidlových zbytků. Na desce číslo 5 bylo vyzkoušeno válcování. Válcování bylo oproti lisování rovnoměrnější, ovšem bylo nutné provádět válcování ve všech směrech, jinak by pájka byla rozválcována pouze do jednoho směru mimo pad. Dále je ze snímku z mikroskopu viditelné celkově mírné vytlačení pájky přes okraje padu, což by mohlo znamenat nepřesné přilnutí druhé šablony. I díky tomu bylo nakonec rozhodnuto vynechat válcování.

Přes šablony viz. tab 3.1 byla nanesena druhá vrstva pájky a to Sn48Bi52. U některých kombinací šablon se ukázalo množství nanesené pájky jako nedostatečné. A to hlavně na desce číslo 1, na které byla použita stejná šablona jako pro tisk první vrstvy a to 100 µm s plnou velikostí oken. V menší míře se stejný problém projevoval i v případě desky číslo 3 kde byly také použity obě šablony o tloušťce 100 µm, avšak pro první pastu se zmenšenou velikostí oken. V případě použití druhé šablony o tloušťce 150 µm již byla množství pasty dostatečné a zaplňovala celou plochu padu bez vyčnívajícího ostrůvku první vrstvy uprostřed.

Malé množství pasty na některých deskách následně také způsobovalo problémy i při osazovaní součástek, které pak nedostatečně drželi v pastě. Součástky byly osazovány ručně na osazovacím poloautomatu. Ruční osazení mohlo do experimentu vnést jistou chybu. Na osazovacím poloautomatu je výhodu držení vakuovou pipetou s kolmým usazením součástky a automatickém spínaní vakua, správné osazení zejména záleží na zkušenostech a zručnosti obsluhy. Odchylky v rámci jedné desky nejsou velkým problémem neb je na jedné desce relativně velký počet testovacích součástek a tyto chyby tak částečně eliminuje průměrování hodnot. Oproti tomu odchylky v osazení mezi deskami nejsou případně nijak ošetřeny a mohli tak mít vliv na výsledek experimentu. Pro snížení vlivu chyb a vyšší konzistentnost by tak bylo vhodné osazení na automatické osazovačce či v případě ručního osazování delší praxe obsluhy.

Na přetavovací peci byl nastaven profil pro SnBi pájku a postupně byly všechny

desky přetaveny. Po vychladnutí a očištění tavidlových zbytků byly spoje zkontrolovány pod mikroskopem. Bylo provedeno měření odporu a provedena trhací zkouška na 8 rezistorech na každé desce. Výsledky měření jsou v kapitole "Vyhodnocení výsledků", Naměřené odpory jsou v tab. 3.2 a výsledná síla potřebná k odtrhnutí součástky v tab. 3.4.

3.2.4 Průběžné vyhodnocení testu

Deska číslo 1 (způsob osazení viz. tab. 3.1) vykazovala nejhorší výsledky jak při měření odporu, který byl v průměru 144 mΩ tak i při trhací zkoušce, kde pevnost spoje byla výrazně nižší než u ostatních, síla potřebná k odtrhnutí byla průměrně pouze 33,55 N. Mírně lepší vlastnosti měla deska číslo 3 s odporem 136 mΩ a silou 42,4 N. Důvodem ke špatným vlastnostem u těchto dvou desek je malé množství pasty a tím také tavidla při druhém přetavení. U desek 2 a 4, u kterých byla použita pro druhý tisk šablona o tloušťce 150 µm, byly výsledky měření odporu 131,5 mΩ pro desku číslo 2 a 121,4 mΩ pro desku číslo 4. Síla potřebná pro odtrhnutí byla u obou téměř shodná a to 50,1 N pro 2. a 52 N pro 4. Deska číslo 5 u které bylo testováno válcování měla odpor 138,7 mΩ a 43,6 N.

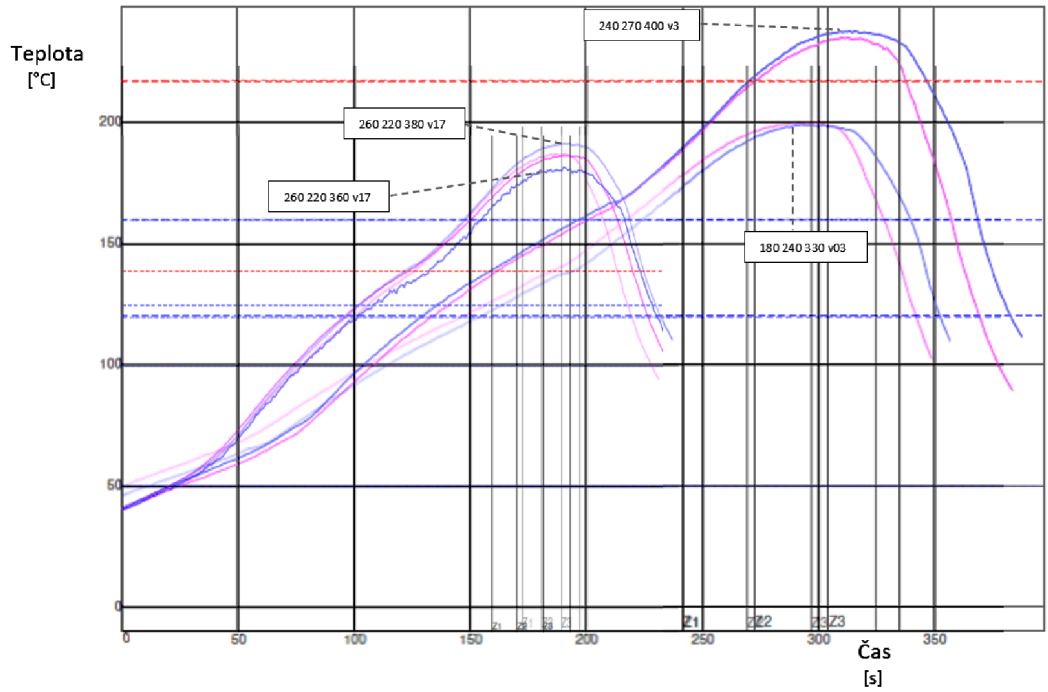
Z testovaných variant byla zvolena pro další postup experimentu ta kterou byla osazena deska číslo 2. Tisk první vrstvy pasty šablonou o tloušťce 100 µm a druhou vrstvu šablonou o tloušťce 150 µm. Obě šablony o stejné velikosti oken. Dobrých vlastností dosahovali desky 2 a 4, u kterých nebyly problémy s osazením součástek. Varianta osazení použitá na desku číslo 2 se jevila lépe z pohledu poměru množství pájek, které by mělo být 1:1.

3.3 Testování s rozdílnými teplotními profily druhého přetavení

3.3.1 Teplotní profily

Pro další část experimentu bylo nutné zvolit, nastavit a změřit vhodné teplotní profily pro otestování vlivu na vlastnosti spoje. Pro testování byly zvoleny tři teplotní profily, které byly odvozeny od teplotních profilů pro jednotlivé pájecí pasty. Pro pájku SAC305 je doporučený profil s relativně dlouhým časem pro teplotní vyrovnání 30-120 s při teplotě 120-160 °C, dobou nad teplotou přetavení 217 °C 60-80 s a maximální teplotou 230-249 °C. Profil odvozený od tohoto profilu má celkově snížené teploty, zachovává však dobu po kterou je deska v peci. U druhého profilu, který je odvozen od profilu pro SnBi pájku, jsou naopak teploty mírně zvýšeny, rychlost dopravníku a tedy doba v peci je zachována. Maximální teplota u obou profilů byla

nastavena v rozmezí 190-200 °C. Jako třetí profil byl pro experiment zvolen stejný profil jako je doporučený pro samotnou SAC305 pájku. U prvních dvou profilů tedy nedošlo k překročení teploty přetavení SAC305 pájky, a rozdílem je doba, po kterou byla teplota nad teplotou tavení SnBi pájky. Porovnání teplotních profilů je na Obr. 3.3.



Obr. 3.3: Teplotní profily.

3.3.2 Tisk pasty a osazení

Nejprve byla natištěna pasta SAC305 přes šablonu o tloušťce 100 µm na desky 6-8. Následně byly přetaveny v peci s doporučeným profilem výrobce. Následně po kompletním očištění pracoviště byla přes stejnou šablonu nanesena na desky 9-11 pasta Sn48Bi58 a ty byly vloženy do pece k přetavení s nastaveným profilem pro tuto pastu. Na tiskovém přípravku byla vyměněna šablona za šablonu o tloušťce 150 µm a na desky 6-8 byla natištěna druhá vrstva pastou Sn42Bi52. Do této pasty byly osazeny součástky na osazovacím automatu stejně jako v předchozí části experimentu. Po osazení desek bylo znovu očištěno pracoviště pro tisk pasty a na desky 9-11 byla natištěna druhá vrstva pasty SAC305. Do této pasty byly také osazeny součástky.

Následně byla nastavena pec na první upravený profil vycházející z profilu pro SnBi pájku se zvýšenou teplotou. Po každém nastavení pece byla pec nechána dostatečně dlouho běžet pro ustálení teplot a pro kontrolu profil přeměřen dataloggerem

a testovací deskou s termočlánky. Po kontrole nastavení profilu již byly desky 6 a 9 vloženy k přetavení. Stejným postupem byly přetaveny desky 7 a 10 s profilem pro SAC305 se sníženou teplotou. Desky 8 a 11 byly přetaveny doporučeným profilem pro SAC305.

3.3.3 Průběžné vyhodnocení testu

Po kompletním osazení všech desek, přetavení a očištění byly desky zhodnoceny vizuálně. Na první pohled byl viditelný častý tombstoning na deskách 9 - 11 tedy těch osazených pastou SnBi v první a SAC305 v druhé vrstvě. Následně bylo provedeno měření odporu na všech deskách. U některých desek nebylo změřeno všech 10 skupin právě z důvodu přerušeného sériového řetězce špatným zapájením některého z odporů. Dalším provedeným testem na těchto deskách bylo testovaní pevnosti na trhacím přístroji.

3.4 Příprava vzorků pro mikrovýbrus

Po osazení všech desek byly vyříznuty z části desky určené pro mikrovýbrusy dvě řady odporů po 5 kusech. Vyříznutí bylo provedeno diamantovým vodou chlazeným kotoučkem na v přípravku upevněné přímé brusce. Vzorky byly označeny a očištěny v ultrazvukové myčce. Z důvodu velké velikosti a relativně velkému množství vzorků byly vzorky umístěny do větších zalévacích forem. Vzorky ze tří (dvou) desek byly umístěny najednou do jedné formy. Pro identifikaci k nim byl umístěna značka tvořená kouskem hadičky s různým počtem drátů uvnitř. Upevnění ve formě a zajištění kolmého směru bylo zajištěno plastovými stojánky viz Obr. 3.4. Po zalití a vytvrzení zalévací hmoty byly vzorky vybroušeny a vyleštěny na metlografické brusce ATM Obr.3.5.

Připravené vzorky byly analyzovány a nasnímány na klasickém a konfokálním mikroskopu. Snímání a prvková analýza na elektronovém mikroskopu byla provedena později, u všech vzorků najednou.

3.5 Zrychlené stárnutí

Po provedení všech testů a odebrání vzorků pro mikrovýbrusy byly desky vloženy do klimatické komory viz. Obr. 3.6. V komoře byly ponechány celkově po dobu tří týdnů. Komora byla nastavena na cyklování teplot 0-100 °C. Teplota cyklování byla zvolena dle doporučení IPC [9] pro zrychlené stárnutí povrchově montovaných součástek. Za jeden týden proběhlo 350 teplotních cyklů, celkem tedy 1050 cyklů,

Obr. 3.4: Umístění vzorku do zalévacích forem.

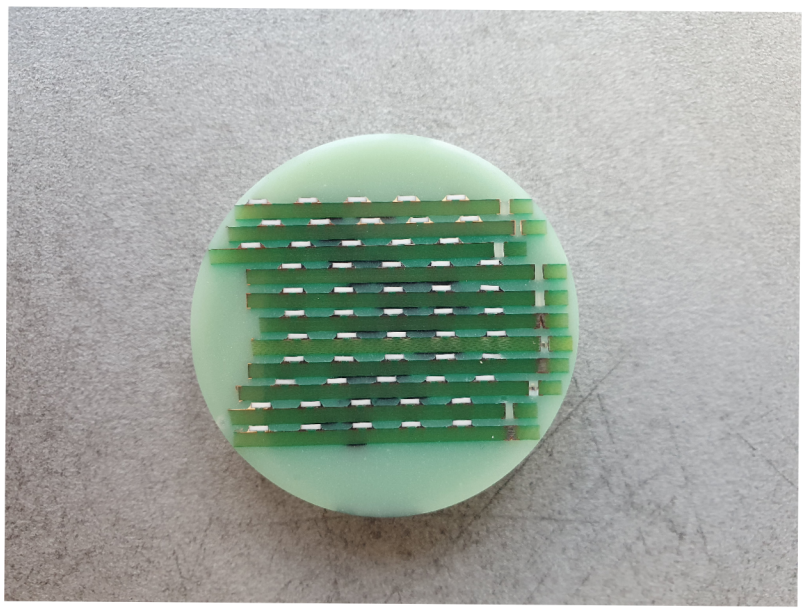
Obr. 3.5: Leštění na metalografické brusce ATM.

Každých 350 cyklů byly vzorky vyjmuty a u všech změřen odpor. Po změření byly vloženy zpět do komory.

Obr. 3.6: Umístění desek v klimatické komoře.

3.5.1 Průběžné vyhodnocení stárnutých vzorků

Po ukončení cyklování byl znovu na všech deskách změřen odpor a znovu otestována pevnost spojů na trhacím přípravku. Na většině desek byla změřena síla odtrhnutí u osmi součástek až na některé, u kterých nebylo možné změřit všech 8 z důvodu vady pájení (tombstoninig). Následně byla z každé desky odříznuta jedna řada součástek pro mikrovýbrus. Vzhledem k náročnosti tvorby mikrovýbrusu a následnému pozorování byla oproti vzorkům před stárnutím zvolena jiná varianta umístění odřezků do zalévací formy. Všechny vzorky byly zarovnány na stejnou velikost a umístěny do jedné zalévací formy. Kolmost vzorků zajišťovalo jejich vzájemné zapření. Tento způsob přípravy vzorků byl mnohem rychlejší při broušení a leštění. Následně se ukázal jako mnohem lepší i pro pozorování pomocí elektronového mikroskopu, umožňoval rychlejší zaměření spoje a provedení prvkové analýzy. U přípravy k zalití velkého počtu vzorků do jedné formy bylo nejdůležitější zajištění jejich shodné výšky aby při broušení byly všechny spoje vybroušeny do shodného místa. Dokončený mikrovýbrus vzorků po stárnutí je na Obr. 3.7.



Obr. 3.7: Mikrovýbrus vzorků po stárnutí.

3.6 Vyhodnocení výsledků

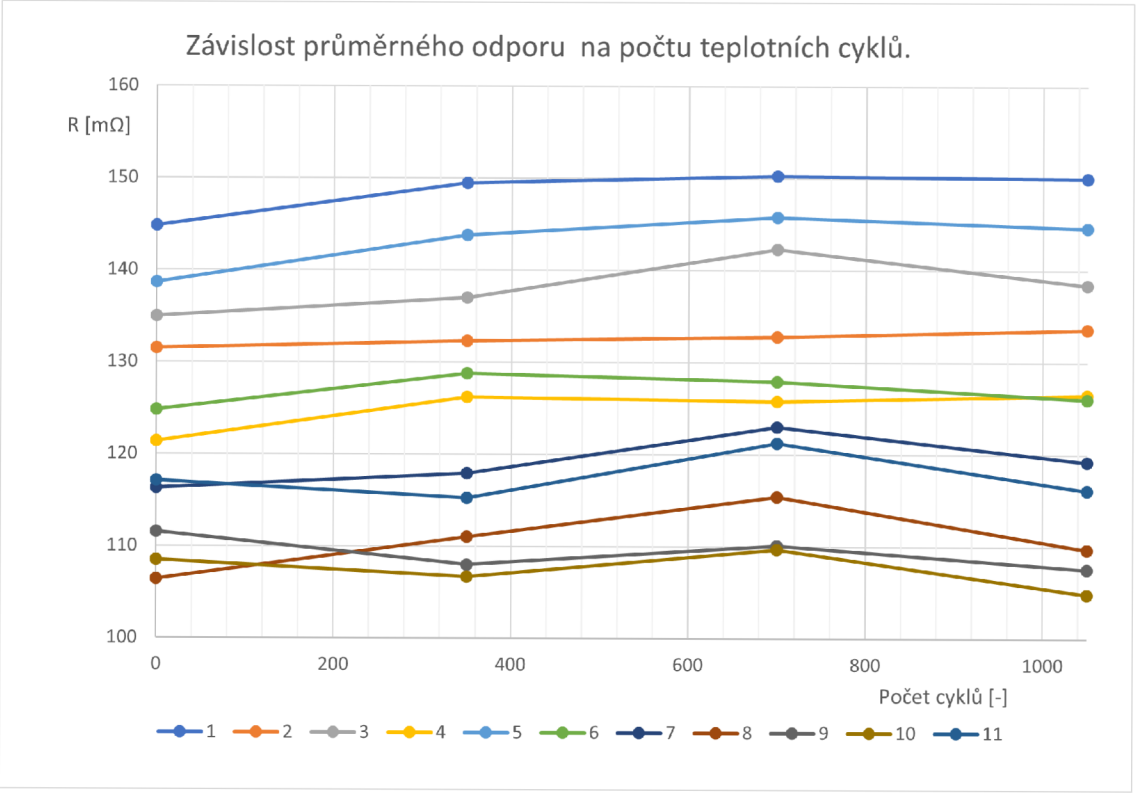
3.6.1 Odpor

Výsledky měření odporu jsou v tabulce 3.2 a vynesené do grafu 3.8. Pro ideální porovnání by bylo vhodné odečíst odpor samotných součástek, který samozřejmě není ideální nula. Odpor součástek však bude kolísat v rámci výrobních tolerancí, a s dostupným vybavením by nebylo měření jedné součástky přesné. Proto je porovnáván odpor celého řetězce. Z porovnání desek s rozdílným způsobem osazení vychází nejhůře s odporem 144,8 mΩ deska 1. Při tomto způsobu je velmi malé množství pájky v druhé vrstvě, tak i celkové množství je nejnižžší.Malé množství pasty v druhé vrstvě a tedy i tavidla při přetavení s osazenými součástkami způsobuje horší smočení součástky což má negativní vliv na odpor spoje. Nejnižší odpor měla varianta 4 - 121 mΩ, kdy bylo největší množství pájky v druhé vrstvě.

Tab. 3.2: Naměřené hodnoty odporu.

	Odpor [mΩ]			
Počet tep. cyklů / DPS #	0	350	700	1050
1	144,8	149,5	150,3	150
2	131,5	132,3	132,8	133,6
3	135	137	142,3	138,4
4	121,4	126,2	125,8	126,5
5	138,7	143,8	145,8	144,6
6	124,8	128,8	127,9	126
7	116,3	117,9	123	119,2
8	106,4	111	115,4	109,7
9	111,6	108	110,1	107,6
10	108,5	106,7	109,7	104,8
11	117,125	115,3	121,3	116,1

Z porvnání desek přetavených rozdílnými profily vidíme že v případě nízkoteplotní pájky Sn42Bi58 v druhé vrstvě na SAC305 se zvyšující se dobou a teplotou přetavení odpor spoje postupně klesá. Oproti tomu v případě opačného pořadí pájek nemá teplota ani délka přetavení tak velký vliv na odpor spoje. U prvních dvou profilů, kdy teplota nepřesáhla 200 °C je odpor přibližně stejný. U třetího profilu, kdy teplota byla nejvyšší (doporučený profil pro SAC305) byl výsledný odpor nejhorši.



Obr. 3.8: Graf závislosti odporu na počtu teplotních cyklů.

Stárnutí vzorků mělo minimální vliv na jejich odpor, a drobné odchylky jsou spíše chybou měření. Například mírně odlišnou teplotou vzorku při měření.

3.6.2 Pevnost spojů

Naměřené síly odtrhu součástek před a po stárnutí jsou v tabulkách 3.3 a 3.4, jejích porovnání pak v tabulce 3.5. Odchylky mezi naměřenými jednotlivými odpory v rámci jedné desky byly do 6 %. Po stárnutí odchylky mezi naměřenými jednotlivými odpory u většiny desek vzrostli v nejhorším případě až na téměř 16 %, v případě desky 10. Zde má vliv i zmenšení pozorovaného vzorku z 8 odporů na 6, z důvodu zmařeného měření, kdy došlo k chybě zaznamenání dat a také byly vynechány z měření odpory u kterých došlo ke thombstoningu. Naměřené hodnoty pevnosti spojů pro desky 1-5 osazované různými způsoby kopírují stejný trend jako naměřené hodnoty odporu u nich a lze předpokládat i stejné příčiny.

Tab. 3.3: Naměřené hodnoty pevnosti před stárnutím.

DPS #	1	2	3	4	5	6	7	8	Průměr [N]	Průměrná odchylka [%]
1	33,8	32,3	31,7	31,6	33,3	37,4	32,4	35,9	33,55	1,61
2	43,4	47,9	58	48,8	50,5	44,1	57,2	50,7	50,08	4,03
3	43,2	45,9	39,3	44,5	48	33,2	43	42	42,39	3,17
4	43,5	54	61,8	61	45,4	54,6	52	43,5	51,98	5,88
5	39,4	42,5	46,5	43,7	44,7	50,7	40,3	40,6	43,55	2,85
6	34,9	44,8	40,3	35,6	38,3	51,6	39,1	x	40,66	4,31
7	39,6	41,4	37,2	51,4	44,6	25,7	47,1	44,9	41,49	5,51
8	63,7	79,7	69,4	81,6	73,2	61,4	67,8	75,5	71,54	5,96
9	57,3	61,6	54,4	64,5	x	55,2	54,6	69,8	59,85	4,86
10	60,5	65,8	55,6	74,8	61,9	64,8	53,4	63,5	62,54	4,69
11	59,6	73,9	63,3	76,3	64,9	60,8	53,6	68,6	65,13	5,86

Tab. 3.4: Naměřené hodnoty pevnosti po stárnutím.

DPS #	1	2	3	4	5	6	7	8	Průměr [N]	Průměrná odchylka [%]
1	45,5	43,6	31,1	40,9	75	50,5	61,4	x	49,71	10,79
2	55,1	62	50,9	44,6	30,8	48,9	46,4	x	48,39	6,67
3	42,9	53,3	40,4	37,8	42,8	44,1	46,8	40,8	43,61	3,34
4	47,3	63,8	53,7	52,9	65,2	67,9	51,3	x	57,44	7,02
5	48,1	40,6	53,8	46,8	40,4	54,8	52,5	42,6	47,45	4,85
6	42	40,5	25,2	43,4	46,3	43,8	41,2	41,6	40,50	3,83
7	42	53,2	49	50,7	41,4	54,9	40,6	41,3	46,64	5,31
8	95,5	107,7	63,4	88,7	103,1	98,3	98,7	90,8	93,28	9,23
9	42	53,5	60,5	71,3	84,6	56,7	80,8	x	64,20	12,60
10	82,6	56,8	70,6	93,2	93,1	47,3	x	x	73,93	15,70
11	79,2	67,5	79,9	62,5	80,2	55,3	65,4	78	71,00	8,33

Tab. 3.5: Porovnání pevnosti.

Deska #	průměr před stárnutím	průměr po stárnutí	Relativní změna
1	33,55	49,71	48,18 %
2	50,08	48,39	-3,37 %
3	42,39	43,61	2,89 %
4	51,98	57,44	10,52 %
5	43,55	47,45	8,96 %
6	40,66	40,5	-0,39 %
7	41,49	46,64	12,41 %
8	71,54	93,28	30,39 %
9	59,63	64,2	7,67 %
10	62,54	73,93	18,22 %
11	65,13	71	9,02 %

Pevnost spojů u desky 6 a 7, tedy s vrchní vrstvou SnBi pájky a teplotou přetavení nepřesahující 200 °C je srovnatelná a pohybovala se průměrně okolo 40 - 42 N. Délka přetavení tedy neovlivnila příliš pevnost spoje. Deska 8 která oproti předchozím byla přetavena vyšší teplotou dosáhla výrazně vyšší pevnosti spoje a to v průměru 71 N.

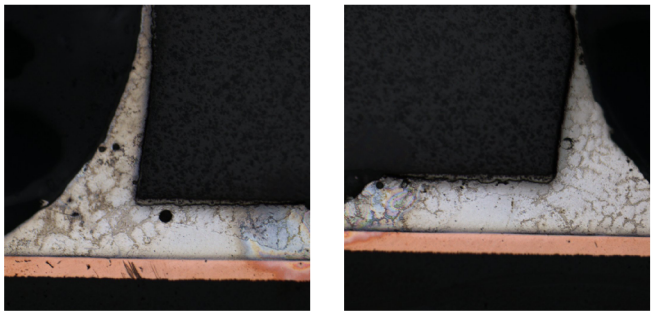
Desky 8-9. tedy desky osazené s Sn42Bi pájkou ve spodní a SAC305 deskou v horní vrstvě, vykazovali téměř shodnou pevnost se všemi profily přetavení a to v rozmezí 59,8-65,3 N. S vyšší teplotou a délkou přetavení se mírně pevnost zvyšovala.

Průměrná pevnost po stárnutí se u většiny vzorků zvýšila. U některých výrazně, u desky 1 o 48 %, u desky 8 o 30 % a u desky 10 o 18 %. Okolo 10 % vyšší pevnost vykazovali desky 4, 5 , 7, 9 a 11. U ostatních byla změna do 5 %.

Po stárnutí byly rozdíly mezi jednotlivými odpory na jedné desce vyšší než před stárnutím. Průměrná odchylka se pohybovala od 3 až do 15 %. Pravděpodobně z důvodu rozšíření či vzniku trhlin v návaznosti na teplotní namáhání. Pevnost samotné pájky se stárnutím zvýšila, avšak stárnutím se více projevily vady pájení.

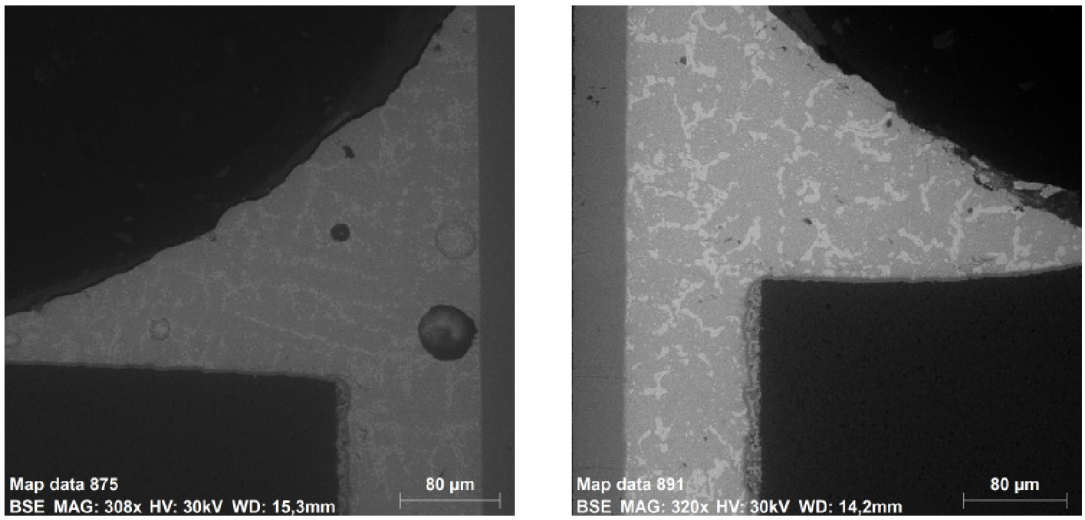
3.6.3 Mikrovýbrusy

DPS 1



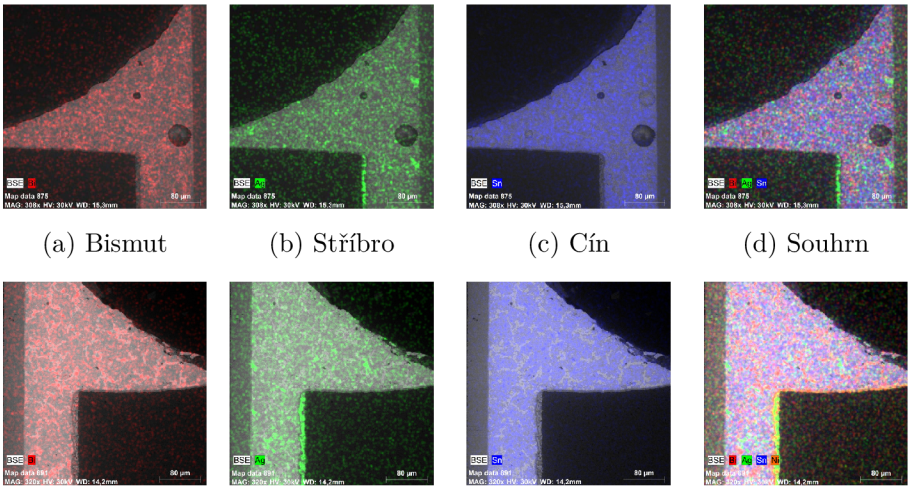
Obr. 3.9: Snímky konfokální mikroskopie deska 1 před stárnutím.

Na snímcích jsou mikrovýbrusy vzorků z desky 1. Na snímcích mikrovýbrusů jak z elektronového mikroskopu tak i konfokálnho mikroskopu je doře viditená struktura spoje. Světlejší oblasti na snímcích z elektronového a tmavší na snímcích z konfokálního mikroskopu jsou oblasti s vysokým obsahem bismutu. Zbytek spoje je tvořen hlavně cínem s malým obsahem stříbra. Rozložení stříbra ve spoji je viditelné na mapě prvkového složení z elektronového mikroskopu a místy tvoří oblasti s vyšší koncentrací. Rozložení bismutu je v rámci spoje téměř homogení. V oblasti pod odporem jsou viditelné oblasti bez bismutu. Při osazení součástky do pasty byla její větší část vytlačena z této oblasti a při přetavení už nedošlo k difuzi do této oblasti. Zároveň je tak způsobeno vyšší usazení součástky na desce. Tlustá vrstva pájky pod součástkou má negativní vliv jak na odpor spoje tak i jeho pevnost. Po stárnutí je viditelná koncentrace bismutu do větších celků. Na snímcích je také viditelné menší množství voidů.



(a) Před stárnutím (b) Po stárnutí

Obr. 3.10: Snímek SEM deska 1.

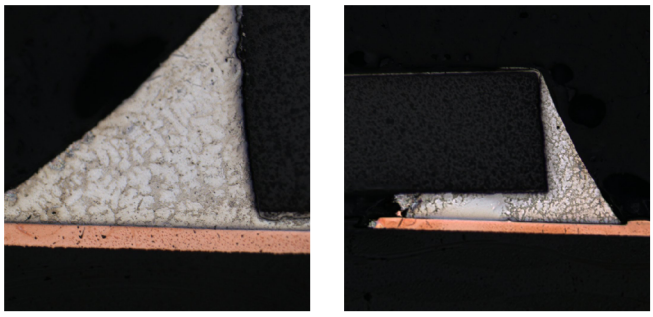


(a) Bismut (b) Stříbro (c) Cín (d) Souhrn

(e) Bismut (f) Stříbro (g) Cín (h) Souhrn

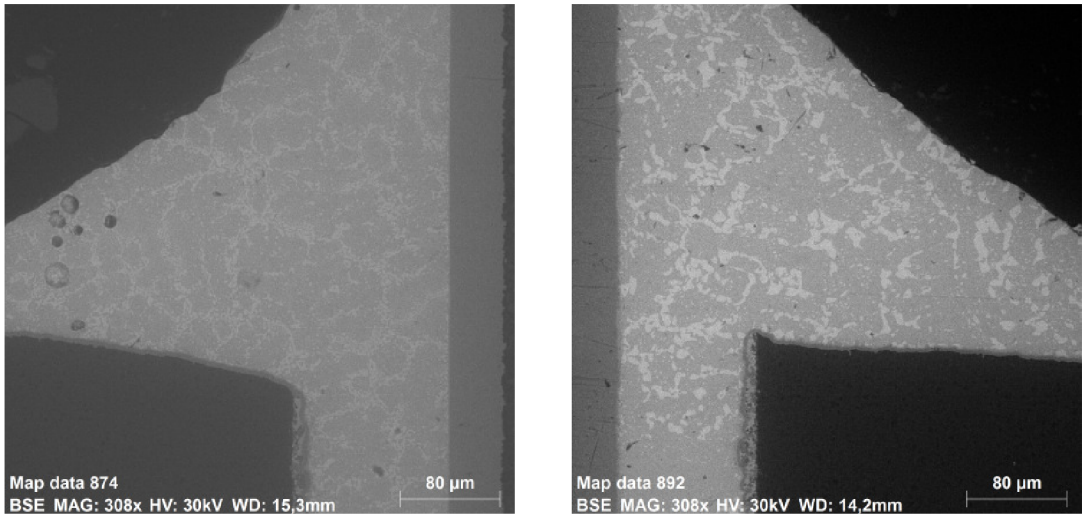
Obr. 3.11: Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h)

DPS 2



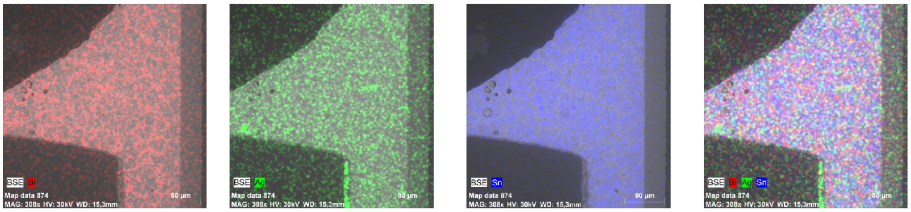
Obr. 3.12: Snímky konfokální mikroskopie deska 2 před stárnutím.

Stejně jako u prvního vzorku se zde objevují oblasti bez besmutu, oproti minulému vzorku však v menší míře. U spojů u kterých došlo k difůzi bismutu do všech částí i pod součástku je součástka blíže desky. Značná část spojů je však stále vysokých. Rozložení oblastí s vysokým obsahem bismutu ve většině spoje se zdá homogení. Stříbro je v ostatních oblastech spolu s cínem rozprostřeno homogenně. Po stárnutí je viditelné shluknutí bismutu do větších krystalů.

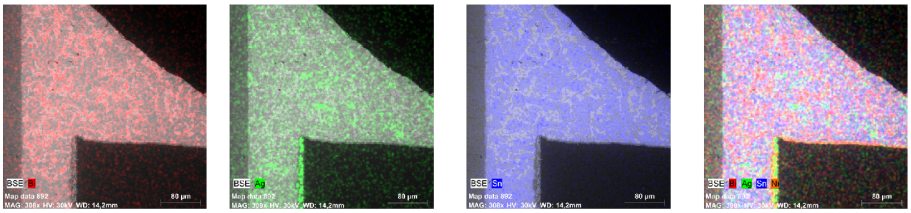


(a) Před stárnutím (b) Po stárnutí

Obr. 3.13: Snímek SEM deska 2.



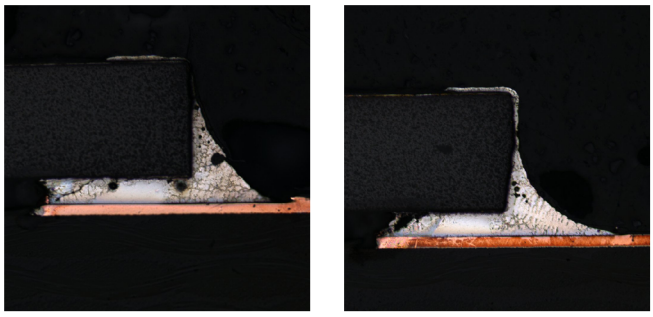
(a) Bismut (b) Stříbro (c) Cín (d) Souhrn



(e) Bismut (f) Stříbro (g) Cín (h) Souhrn

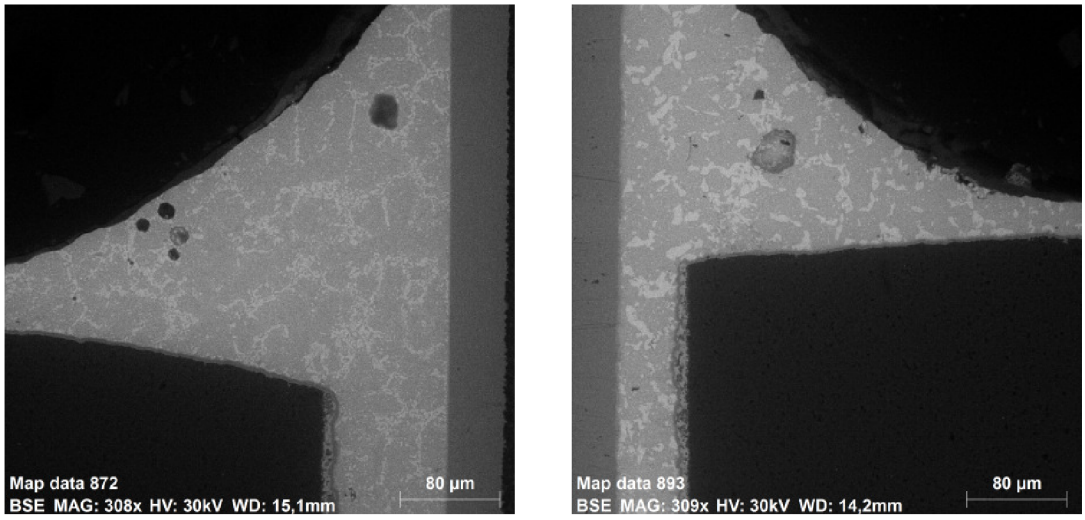
Obr. 3.14: Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h)

DPS 3



Obr. 3.15: Snímky konfokální mikroskopie deska 3 před stárnutím.

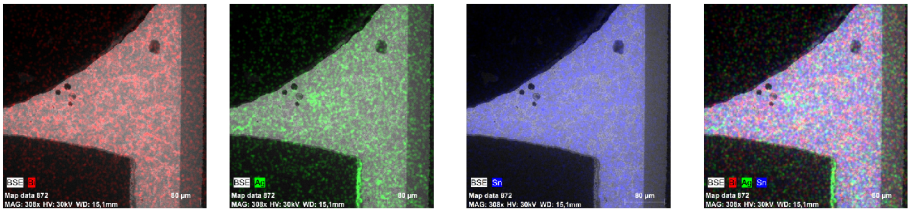
Velmi malé celkové množství pájky. Oblasti s bismutem je relativně málo. Podobně jako na první desce jsou zde časté oblasti bez bismutu v oblasti pod součástkou. Vzhledem k menšímu množství pájky po prvním přetavení jsou součástky blíže k desce.



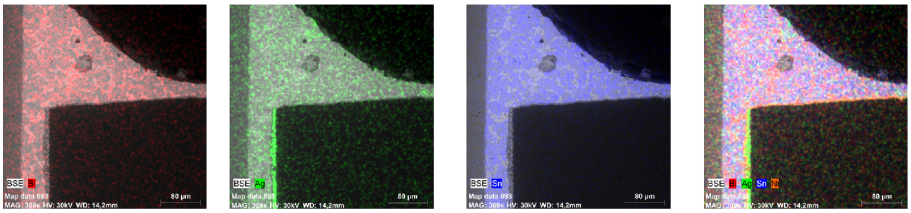
(a) Před stárnutím

(b) Po stárnutí

Obr. 3.16: Snímek SEM deska 3.



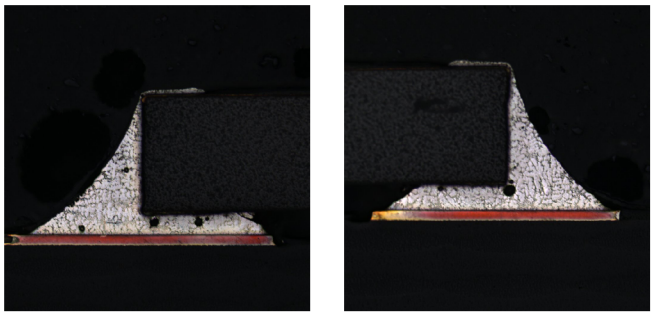
(a) Bismut (b) Stříbro (c) Cín (d) Souhrn



(e) Bismut (f) Stříbro (g) Cín (h) Souhrn

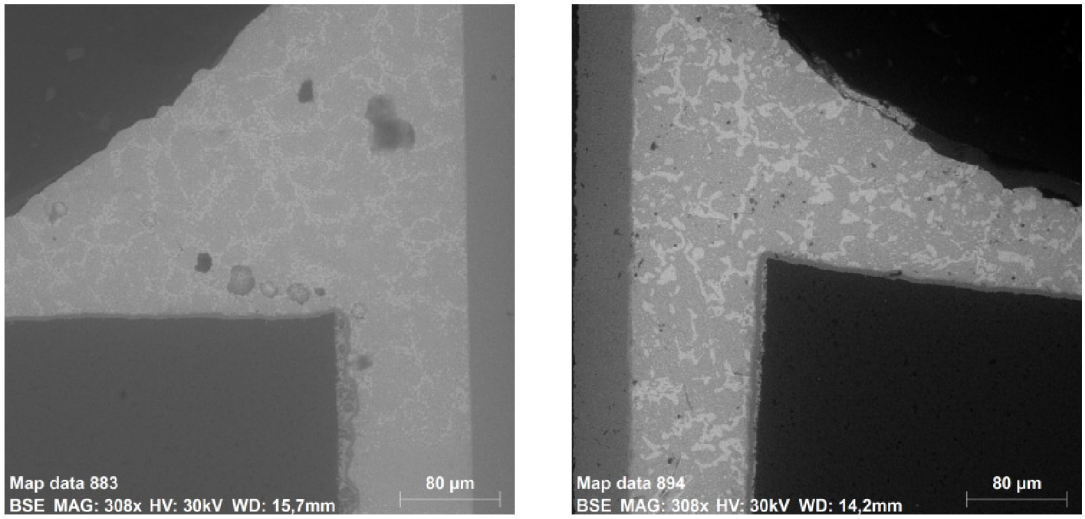
Obr. 3.17: Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h)

DPS 4



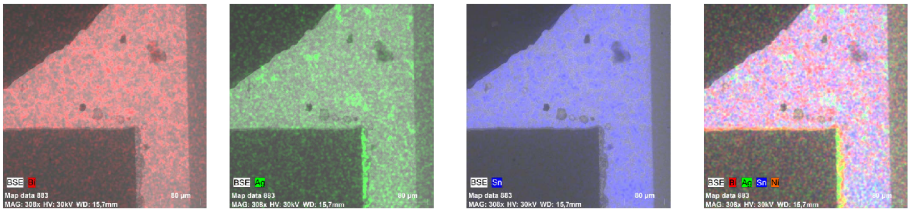
Obr. 3.18: Snímky konfokální mikroskopie deska 4 před stárnutím.

Velká koncentrace oblastí s vysokým obsahem bismutu. Žádné viditelné oblasti s nižším obsahem bismutu. Homogenní struktura spoje. Vrstva pájky mezi součástkou a deskou je malá a homogenně prodifundovaná bismutem.

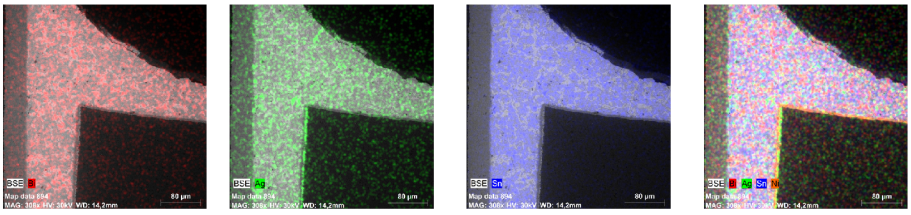


(a) Před stárnutím (b) Po stárnutí

Obr. 3.19: Snímek SEM deska 4.



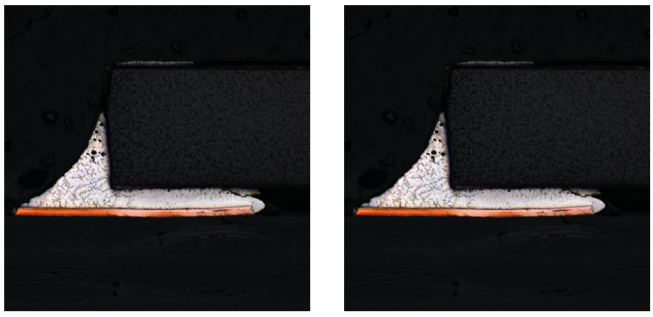
(a) Bismut (b) Stříbro (c) Cín (d) Souhrn



(e) Bismut (f) Stříbro (g) Cín (h) Souhrn

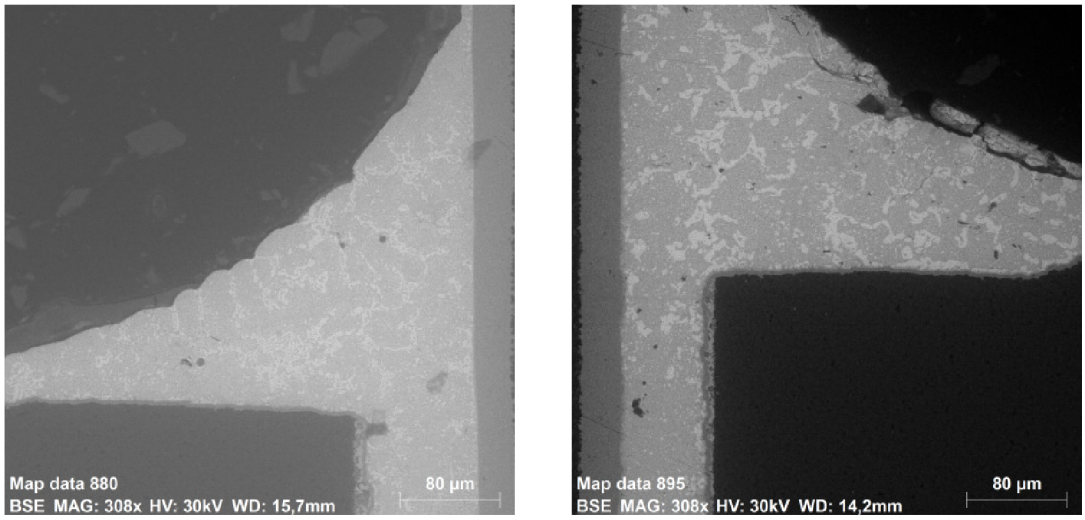
Obr. 3.20: Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h)

DPS 5



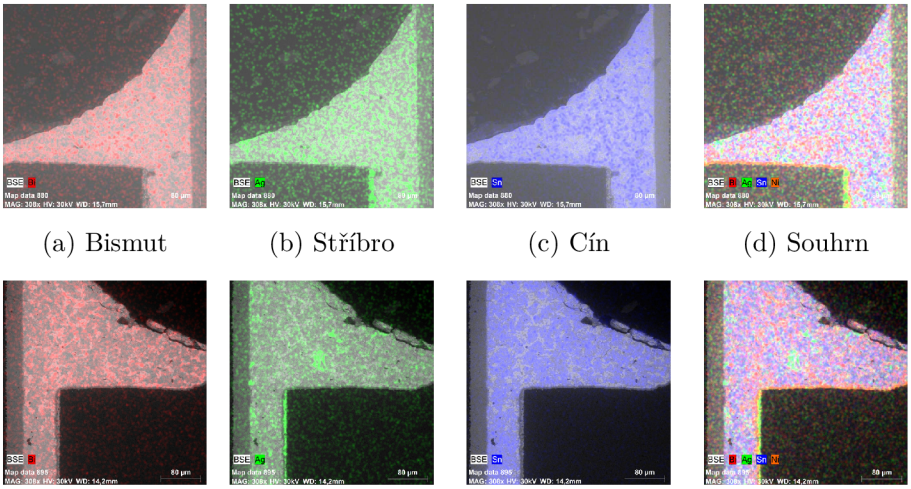
Obr. 3.21: Snímky konfokální mikroskopie deska 5 před stárnutím.

Deska na které bylo testováno válcování. Viditelné oblasti bez bismutu na kořeni spoje a pod součástkou. Válcováním se na okrajích padu vytvořila větší vrstva než u ostatních desek. Bismut z druhé vrstvy pájky se do těchto míst již nedostal. I přes válcování je při nanášení druhé vrstvy tenkou šablonou ve spoji celkově malé množství pájky. Vliv stárnutí je stejný jako u předchozích vzorků a to koncentrace bismutu do větších celků.



(a) Před stárnutím (b) Po stárnutí

Obr. 3.22: Snímek SEM deska 5.

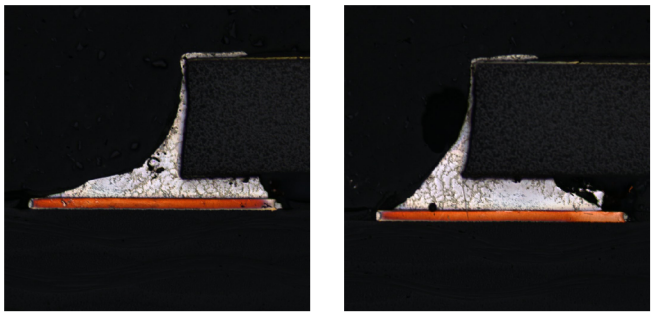


(a) Bismut (b) Stříbro (c) Cín (d) Souhrn

(e) Bismut (f) Stříbro (g) Cín (h) Souhrn

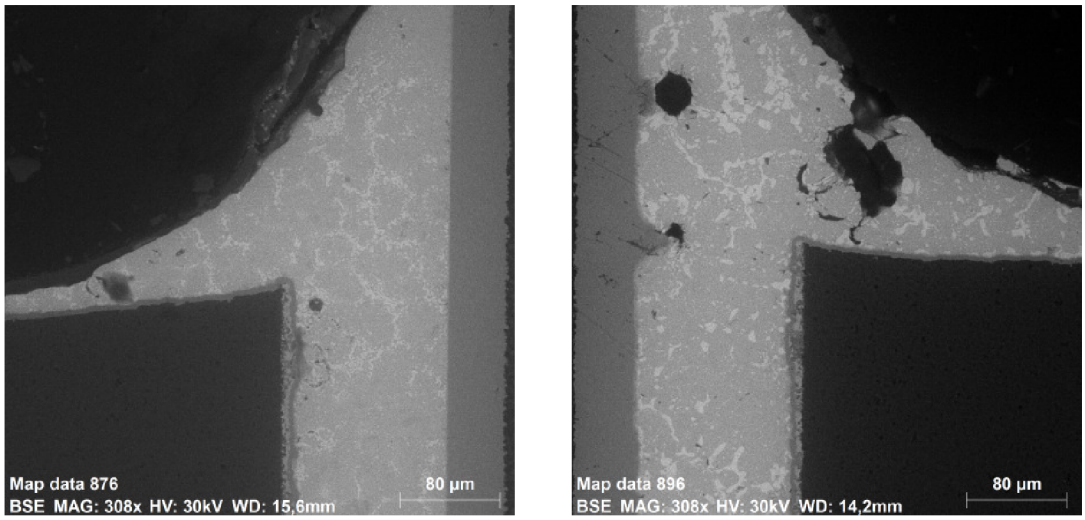
Obr. 3.23: Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h)

DPS 6



Obr. 3.24: Snímky konfokální mikroskopie deska 6 před stárnutím.

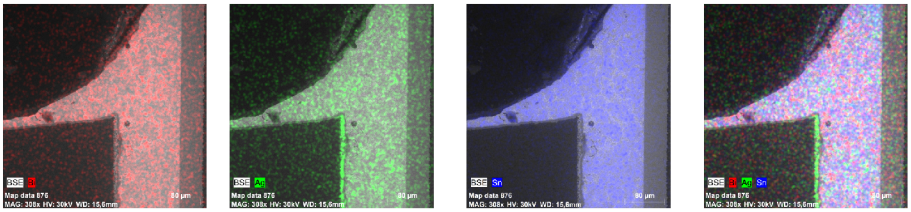
Spoje na desce 6 obsahují velké množství oblastí s malým obsahem bismutu. Vrstva pájky mezi deskou a součástkou je příliš velká. Větší množství voidů.



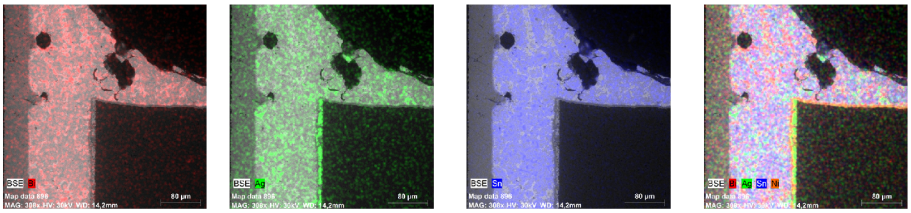
(a) Před stárnutím

(b) Po stárnutí

Obr. 3.25: Snímek SEM deska 6.



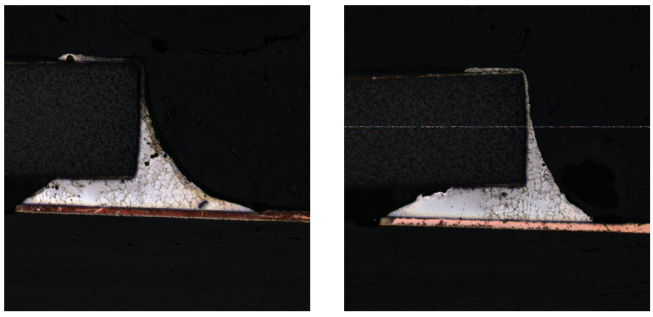
(a) Bismut (b) Stříbro (c) Cín (d) Souhrn



(e) Bismut (f) Stříbro (g) Cín (h) Souhrn

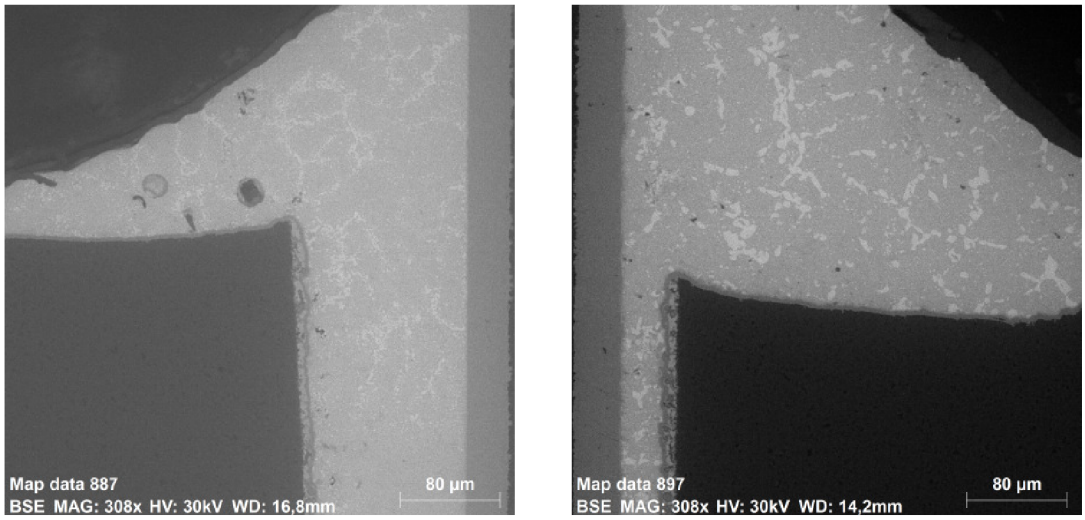
Obr. 3.26: Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h)

DPS 7



Obr. 3.27: Snímky konfokální mikroskopie deska 7 před stárnutím.

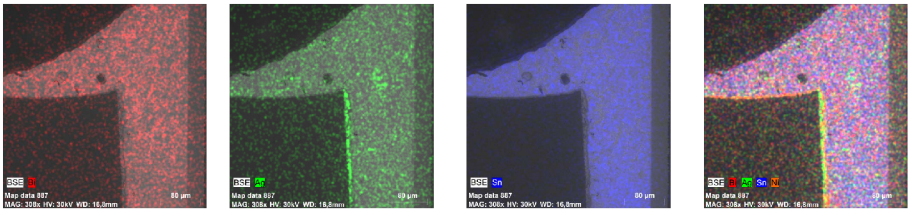
Delší čas přetavení oproti předchozímu vzorku neměl velký vliv na strukturu spoje. Velké oblasti s malým obsahem bismutu pod součástkou. Velká vrstva pájky mezi součástkou a deskou.



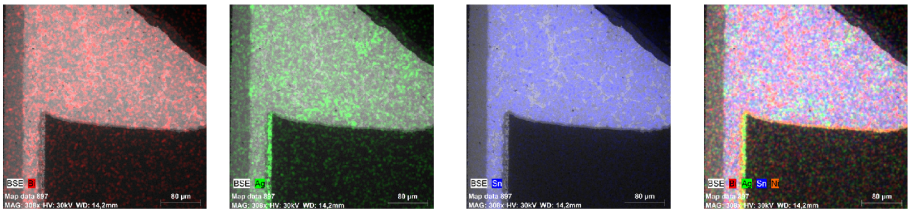
(a) Před stárnutím

(b) Po stárnutí

Obr. 3.28: Snímek SEM deska 7.



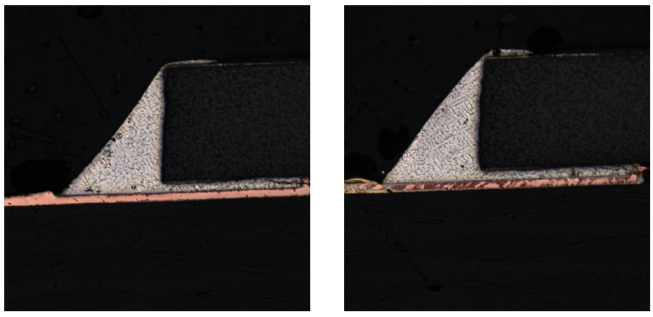
(a) Bismut (b) Stříbro (c) Cín (d) Souhrn



(e) Bismut (f) Stříbro (g) Cín (h) Souhrn

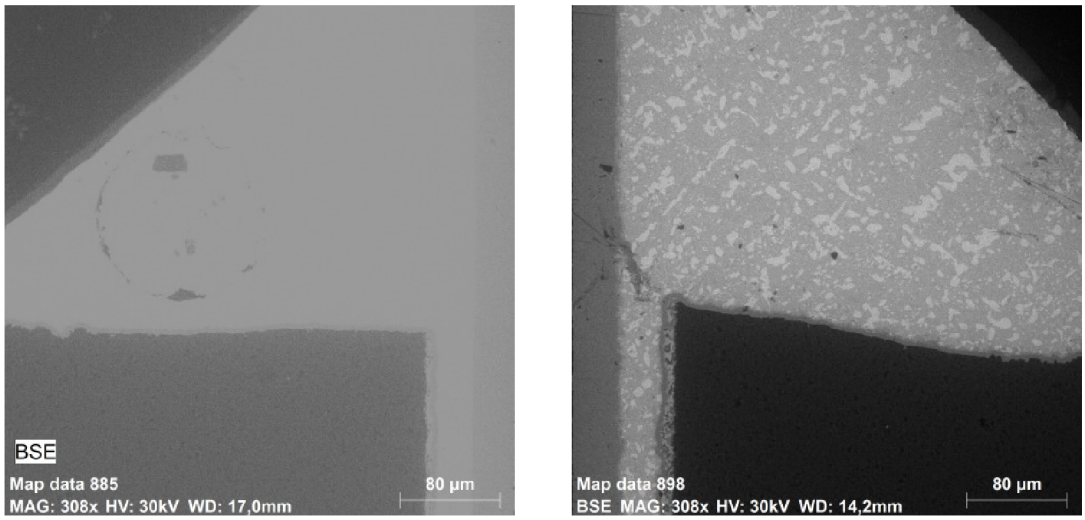
Obr. 3.29: Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h)

DPS 8



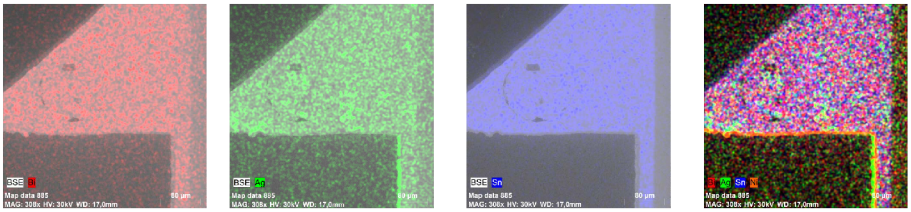
Obr. 3.30: Snímky konfokální mikroskopie deska 8 před stárnutím.

Vysoce homogenní a jemné rozložení bismutu v celém objemu spoje. Snímek z elektronového mikroskopu vzorku před stárnutím byl bohužel pořízen se špatným nastavením a proto není struktura zřetelná, snímky z konfokálního mikroskopu a mapovaní jsou v pořádku. Velice tenká vrstva pájky mezi deskou a součástkou. Po stárnutí jsou zrna bismutu větší, stále však menší a jemněji rozložené v objemu než v minulých vzorcích. Při vysoké teplotě přetavení došlo ke kompletní difuzi bismutu do celého objemu spoje.

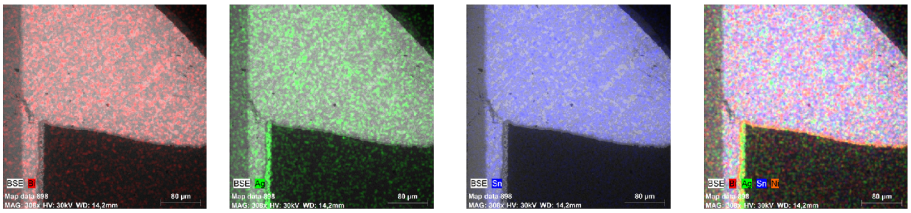


(a) Před stárnutím (b) Po stárnutí

Obr. 3.31: Snímek SEM deska 8.



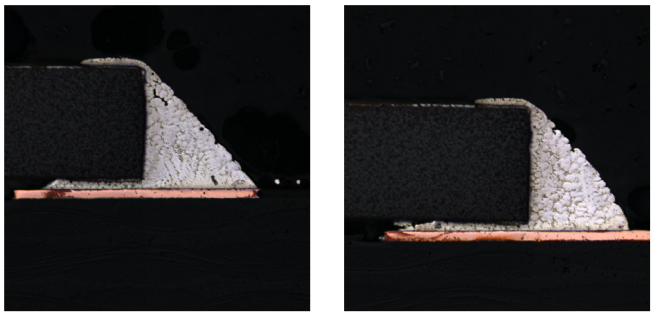
(a) Bismut (b) Stříbro (c) Cín (d) Souhrn



(e) Bismut (f) Stříbro (g) Cín (h) Souhrn

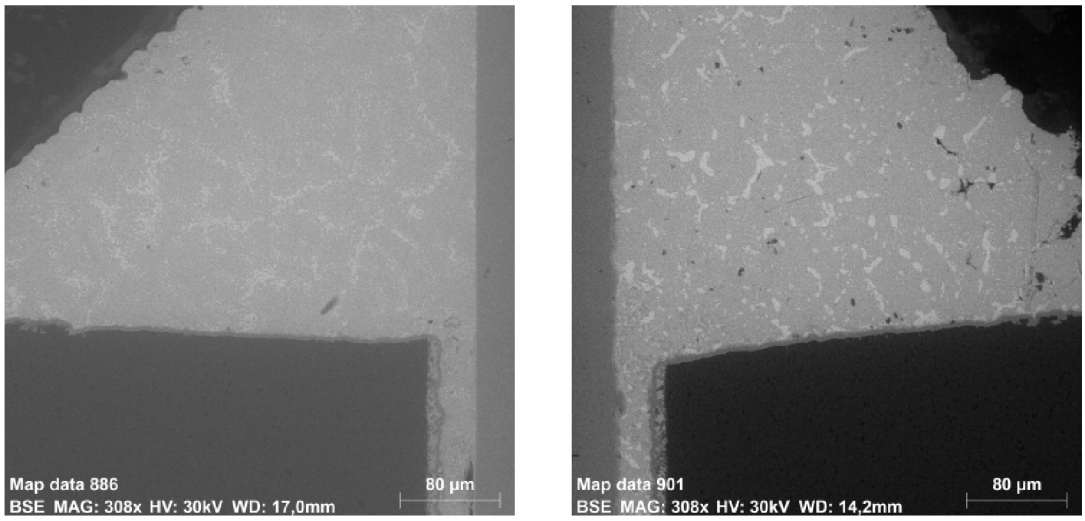
Obr. 3.32: Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h)

DPS 9



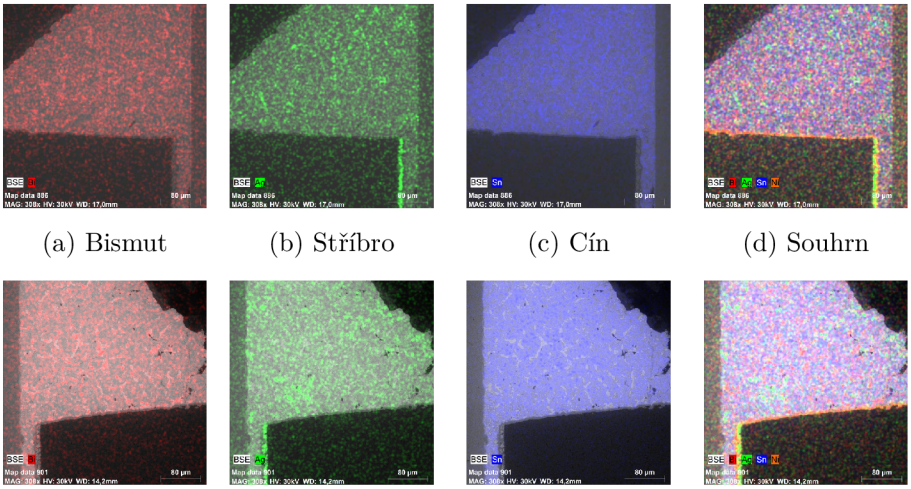
Obr. 3.33: Snímky konfokální mikroskopie deska 9 před stárnutím.

Deska s obráceným pořadím pájecích past. Sn42Bi58 ve spodní vrstvě a vrchní vrstva SAC305. Oproti desce 8 hrubší struktura a větší zrna bismutu, ale jeho rozložení je stejně homogenní. Vrstva mezi součástkou a deskou je také velice tenká. A to i přes nízkou teplotu a krátký čas přetavení.



(a) Před stárnutím (b) Po stárnutí

Obr. 3.34: Snímek SEM deska 9.

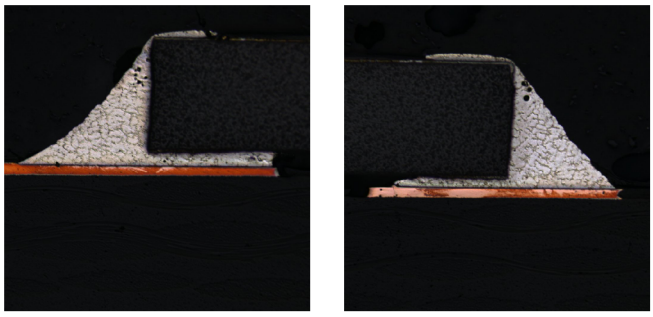


(a) Bismut (b) Stříbro (c) Cín (d) Souhrn

(e) Bismut (f) Stříbro (g) Cín (h) Souhrn

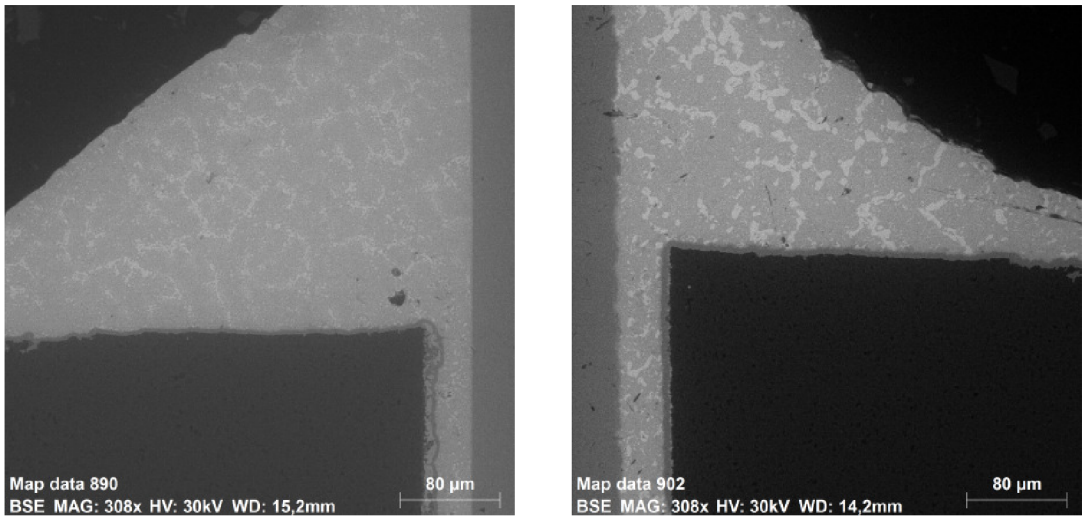
Obr. 3.35: Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h)

DPS 10



Obr. 3.36: Snímky konfokální mikroskopie deska 10 před stárnutím.

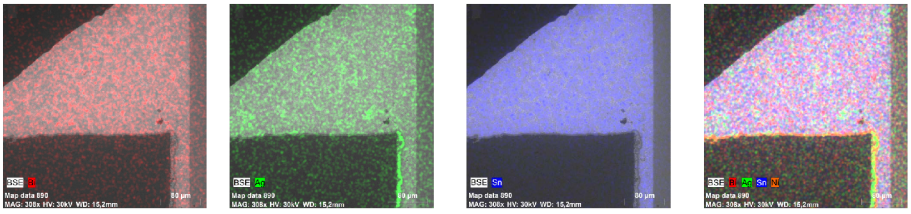
Stejné vlastnosti jako u desky číslo 9, delší doba přetavení neměla viditelný vliv na strukturu spoje.



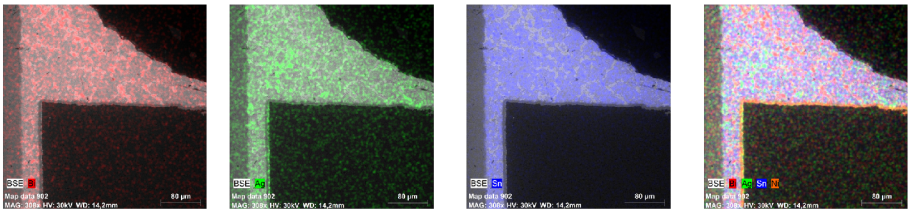
(a) Před stárnutím

(b) Po stárnutí

Obr. 3.37: Snímek SEM deska 10.



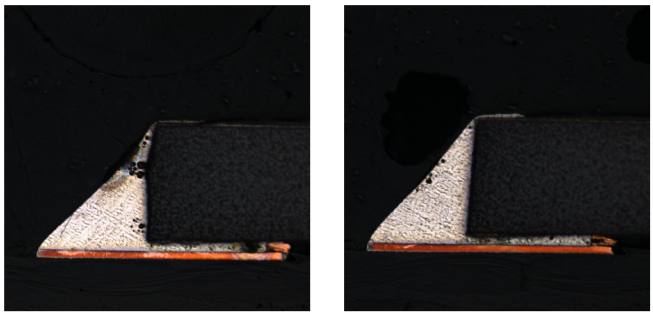
(a) Bismut (b) Stříbro (c) Cín (d) Souhrn



(e) Bismut (f) Stříbro (g) Cín (h) Souhrn

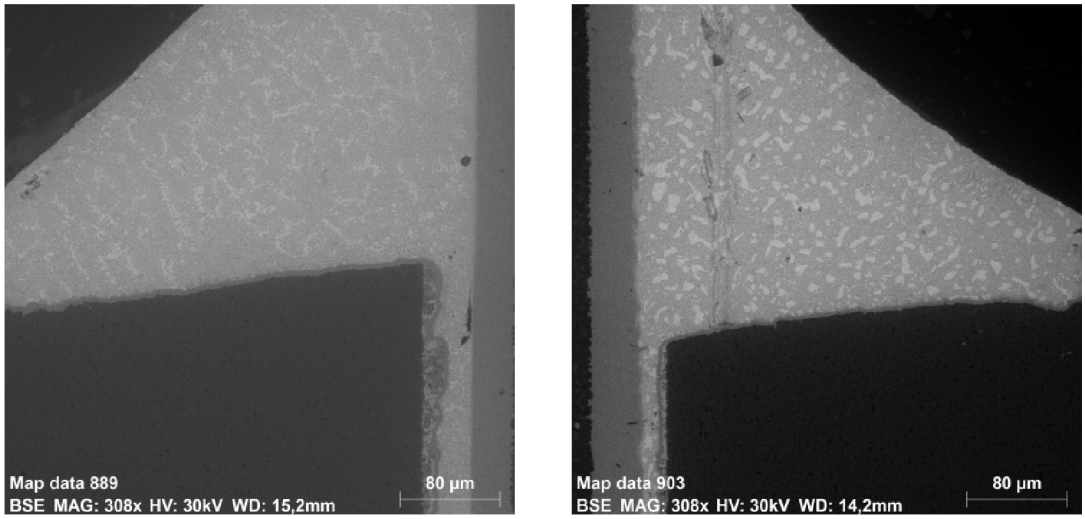
Obr. 3.38: Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h)

DPS 11



Obr. 3.39: Snímky konfokální mikroskopie deska 11 před stárnutím.

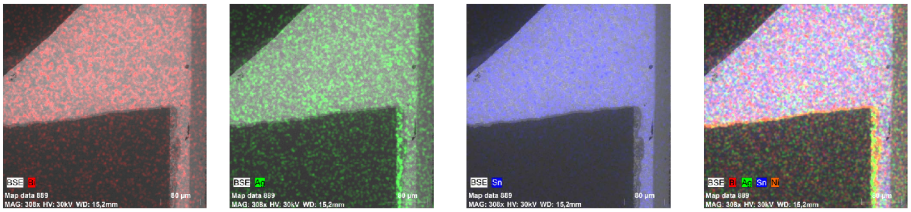
Stejně jako u desky 8 při vysoké teplotě přetavení druhé vrstvy vznikla velice jemná struktura spoje s malými zrny bismutu. Vrstva pájky mezi deskou a součástkou je velmi malá.



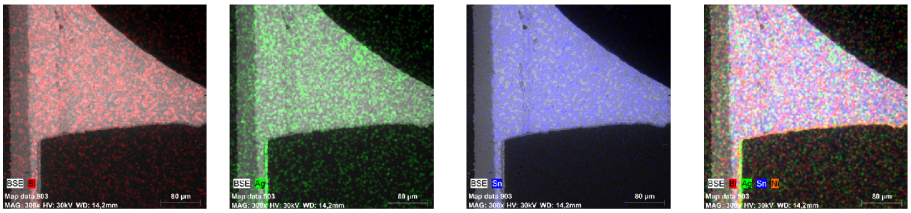
(a) Před stárnutím

(b) Po stárnutí

Obr. 3.40: Snímek SEM deska 11.



(a) Bismut (b) Stříbro (c) Cín (d) Souhrn



(e) Bismut (f) Stříbro (g) Cín (h) Souhrn

Obr. 3.41: Mapa prvkového složení před (a, b, c, d) a po stárnutí (e, f, g, h)

Závěr

Práce se zabývá teorií pájeného spoje, primárně bezolovnatými pájkami. Jejich kombinací při procesu pájení a vlastnostmi takových spojů. Výsledkem práce je navržený experiment pro analýzu vlastností pájených spojů tvořených kombinací slitin. Primárně se jedná o slitiny SnBi a SAC. Byly navrženy a vyrobeny testovací desky plošných spojů pro testování odporu, mechanické pevnosti a vnitřní struktury spoje. Dále byly navrženy šablony o různých tloušťkách pro dvoustupňový tisk pasty. Byly navrženy testy a měření vlastností spojů. Konkrétně měření odporu, a pevnosti spoje. Postupy pro hodnocení struktury spoje a vlivu stárnutí na vlastnosti spoje. Byl navržen postup pro osazení desek.

V rámci otestování postupu bylo vyrobeno 20 kusů testovacích desek a tři rozměry šablon pro tisk pasty. Pět kusů desek bylo osazeno různými způsoby s rozdílnou velikosti šablon pro první a druhou vrstvu pájky. Z výsledků tohoto testu lze odvodit požadavky na velikosti šablon pro další testování. Pro další testy bylo zvoleno použití rozměrů šablon tak, aby poměr objemu pájek byl 1:1. Šablony byly vyrobeny v laboratorních podmínkách leptáním bronzové fólie. Pro další testování by bylo třeba vyrobit další šablony o různých tloušťkách. Bylo by vhodné vyrobit nerezové šablony průmyslovým způsobem.

Šest desek bylo osazeno použitím stejných šablon. Tři desky byly osazeny s pájkou s nižší teplotou tavení (Sn42Bi58) ve spodní vrstvě a pájkou s vyšší teplotou tavení (SAC305) v horní vrstvě). U všech testovacích desek byly provedeny všechny navržené postupy měření a testování. Byl změřen odpor a pevnost spoje. Způsob osazení měl na výsledné parametry vliv hlavně celkovým množstvím nanesené pasty. U některých postupů bylo množství příliš malé. Vliv teplotního profilu by se dal rozdělit na vliv maximální teploty a doby trvání přetavení. Obecně vyšší teplota a delší doba přetavení měla za následek vyšší homogenitu spoje a lepší vlastnosti. Pořadí nanášené pájky mělo velký vliv na formování spoje. Postup s nízkoteplotní pájkou ve spodní vrstvě tvořil homogenní spoje při nižší teplotě než v opačném případě. Objevovali se však častěji vady typu tombstoning, tedy zvednutí jedné strany součástky. Zde by bylo vhodné více experimentovat s teplotním profilem a sledovat vliv na četnost této vady.

Pro konkrétní popis vlivu by bylo nutné provést testy na mnohem větším množství vzorků s více variantami. Vhodné by bylo postupné snižovaní teploty, profil použitý v testu měl maximální teplotu stále ještě relativně vysokou. Zároveň by bylo vhodné, pro minimalizaci dalších vlivů, otestovat více vzorků se stejným způsobem osazení. Pro větší množství vzorků by bylo vhodné některé části procesu automatizovat. Například osazení na automatickém osazovacím stroji. Automatizované měření odporu a pevnosti spojů. Pro možnost automatizace by byla vhodná

úprava testovací desky. Například vyvést vodiče pro měření odporu na konektor. Část pro tvorbu mikrovýbrusů přesně navrženou na požadovanou velikost pro zalévání a lehce oddělitelnou pomocí V drážek na desce. Stejně tak oddělitelnou část pro testování pevnosti spojů. Pro usnadnění tvorby vzorků pro mikrovýbrusy vytvořit například pomocí 3D tisku přípravek pro zajištění polohy a kolmosti v zalévací formě a označení vzorku.

Pro opakovatelnost experimentu a pro přesné zjištění množství nanesených past a jejich poměru by bylo vhodné vhodné SPI (solder paste inspection). Jinou možností, v případě ručního tisku v laboratorních podmínkách, by bylo zvážení hmotnosti desky před a po tisku pasty. Pro určení vlastností výsledné pájky hlavně tedy teploty přetavení a oblasti pastovitosti by mohla být použita metoda DSC (Diferenční skenovací kalorimetrie).

Literatura

[1] LIPAVSKÝ, L. *Porovnání vlastností pájených spojů na keramických substrátech pomocí zkoušky střihem* Brno 2012. [cit. 2021-12-23].Diplomová práce. VUT.

[2] ŠIMON, Vojtěch. *Spolehlivost pájených spojů LED panelů* [online]. Brno, 2017 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace?zp_id=103248>. Diplomová práce. VUT.

[3] STARÝ J., KAHLE P. *Plošné spoje a povrchová montáž.* [skripta]. Nedatováno. VUT FEKT Brno

[4] STEJSKAL, Petr. *Predikce spolehlivosti pájeného spoje.* Brno, 2014 [cit. 2021-12-23].Dizertační práce. VUT.

[5] CINGEL, Štefan *Teplotní stárnutí bezolovnatých spojů na keramice.* Brno, 2020 [cit. 2021-12-23].Diplomová práce. VUT.

[online]. 2011, poslední aktualizace 2. 9. 2011 [cit. 19. 10. 2011]. Dostupné z URL: <http://www.citace.com/CSN-ISO-690.pdf>

[6] THORNTON, Scott. *Tin whiskers: What happens when they spontaneously erupt?* [online]. [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: https://www.microcontrollertips.com/when-tin-whiskers-spontaneously-erupt-faq/

[7] SWANSON, Tayler John. *Properties of Mixing SAC Solder Alloys with Bismuth-containing Solder Alloys for a Low Reflow Temperature Process* [online]. Rochester Institute of TechnologyRochester Institute of Technology, 2018 [cit. 2021-12-27]. Dostupné z:<https://scholarworks.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=11173&context=theses>

[8] Hadian, Faramarz & Genanu, Mohammed & Cotts, Eric.. *ELECTROMIGRATION BEHAVIOR OF SAC(305) / SNBIAG MIXED SOLDER ALLOY ASSEMBLIES.* (2019)

[9] IPC-SM-785: . *Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments.* IPC, 1992.

[10] Yu-An Shen& Shiqi Zhou& Jiahui Li& Chih-han Yang& Sijie Huang& Shih-kang Lin& Hiroshi Nishikawa. *Sn-3.0Ag-0.5Cu/Sn-58Bi composite solder joint assembled using a low-temperature reflow process for PoP technology.* (2019)

Seznam příloh

A Teplotní profily **73**

A.1 Teplotní profil 180 240 330 v03 74

A.2 Teplotní profil 240 270 400 v03 75

A.3 Teplotní profil 260 220 360 v17 76

A.4 Teplotní profil 1260-220-380 v17 77

B Obsah elektronické přílohy **78**

A Teplotní profily

Naměřené teplotní profily profiloměrem SlimKIC 2000.

A.1 Teplotní profil 180 240 330 v03

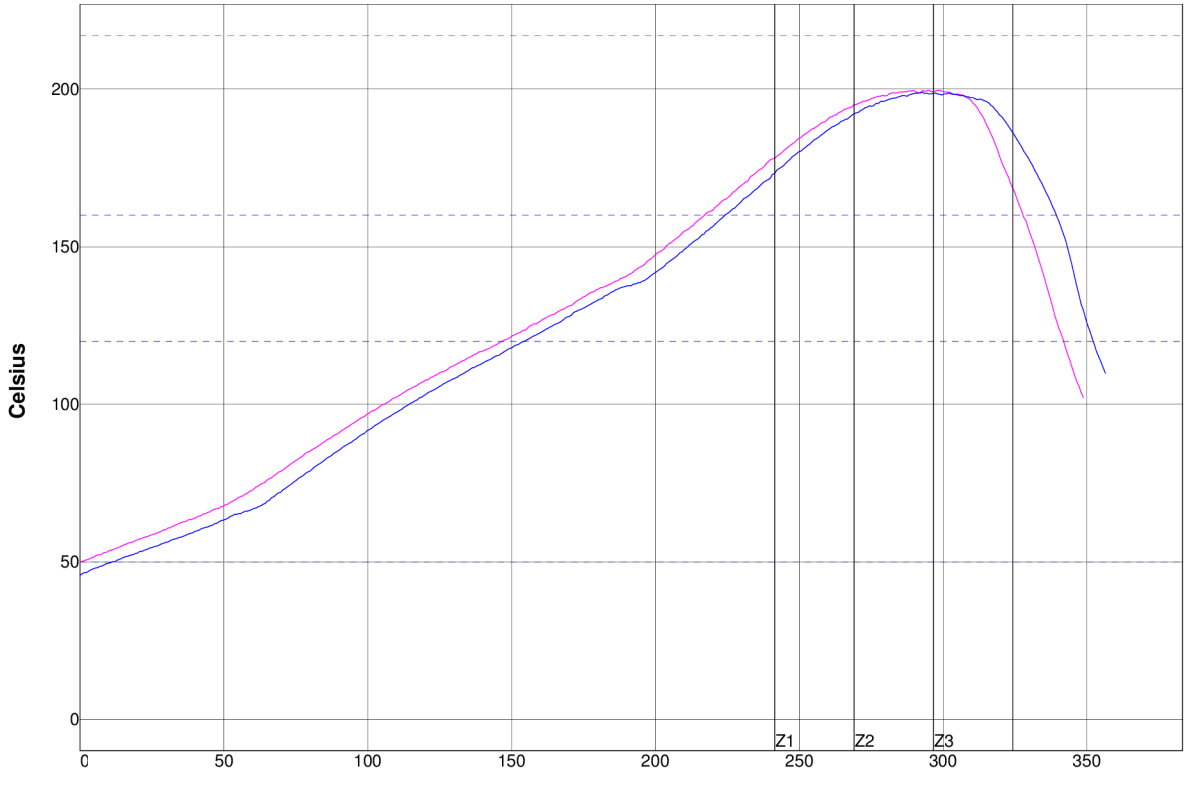
Bedlivy 220301 **Mon Mar 28 2022 16:51:47**

Company: FEKT VUT **Site: Electrotechnology**
Oven Name: DIMA **Process Window Name: SAC305**

Setpoints (Celsius)

Zone	1	2	3
Top	280	260	300
Bottom	280	260	300

Conveyor Speed (cm/min): 16.0



PWI= 700%	Max Rising Slope		Preheat 50-120C		Soak Time 120-160C		Reflow Time /217C		Peak Temp	
R10	0.80	-36%	145.48	270%	70.12	-11%	0.00	-700%	199.67	-419%
R100	0.82	-34%	143.00	253%	69.94	-11%	0.00	-700%	199.02	-426%
Delta	0.02		2.48		0.18		0.00		0.65	

Process Window:

Solder Paste: Qualitek DSP 865A Sn/Ag/Cu NC-LF Air/N2

Statistic Name	Low Limit	High Limit	Units
Max Rising Slope (Target=1.3)	0	2.5	Degrees/Second
(Calculate Slope over 20 Seconds)			
Preheat Time 50-120C	90	120	Seconds
Soak Time 120-160C	30	120	Seconds
Time Above Reflow - 217C	60	80	Seconds
Peak Temperature	230	249	Degrees Celsius

Description:

180-240-330 v03

Profiled Using KIC 2000 Technology
KIC
San Diego, CA USA
Tel: +1 858 673 6050
Fax: +1 858 673 0085
www.kicthermal.com
tech@kicmail.com

A.2 Teplotní profil 240 270 400 v03

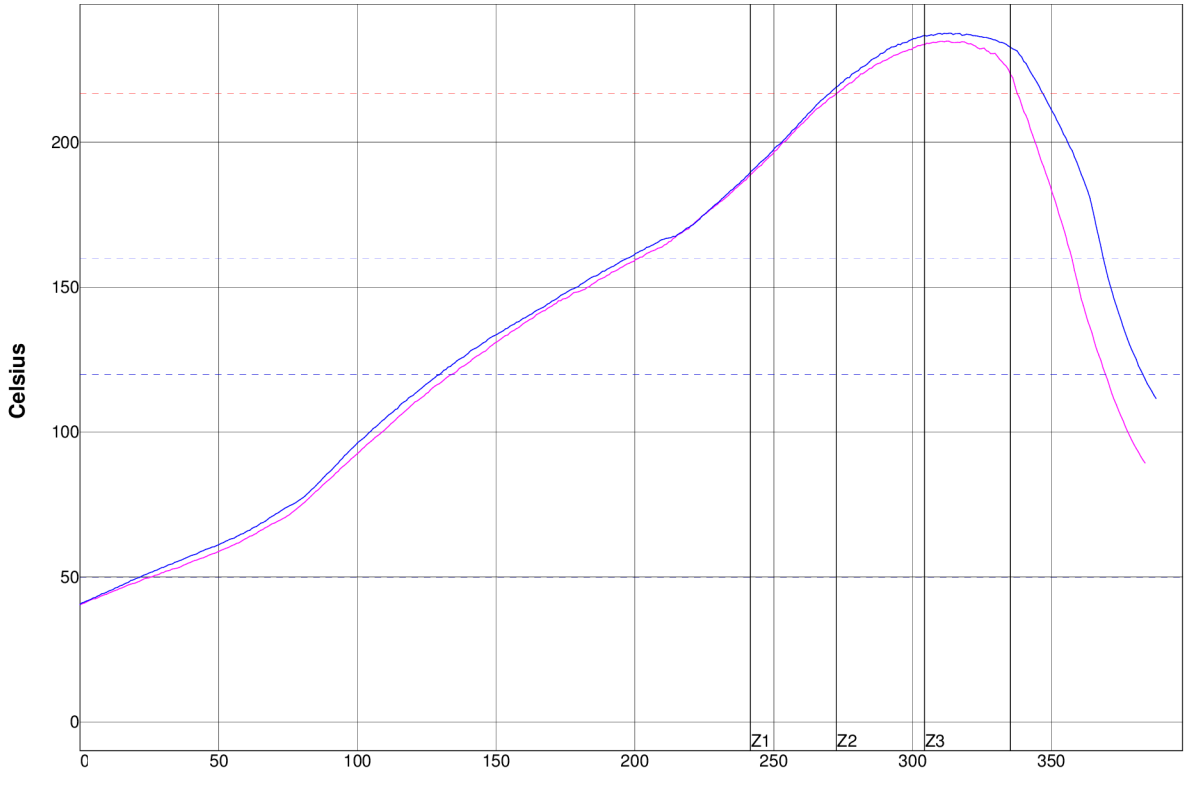
Bedlivy SAC **Mon Mar 28 2022 14:36:15**

Company: FEKT VUT **Site: Electrotechnology**
Oven Name: DIMA **Process Window Name: SAC305**

Setpoints (Celsius)

Zone	1	2	3
Top	280	260	300
Bottom	280	260	300

Conveyor Speed (cm/min): 16.0



PWI= 65%	Max Rising Slope		Preheat 50-120C		Soak Time 120-160C		Reflow Time /217C		Peak Temp	
R10	0.97	-22%	108.58	24%	67.22	-17%	64.83	-52%	234.99	-47%
R110	0.99	-21%	108.18	21%	67.43	-17%	76.53	65%	237.69	-19%
Delta	0.02		0.40		0.21		11.70		2.70	

Process Window:

Solder Paste: Qualitek DSP 865A Sn/Ag/Cu NC-LF Air/N2

Statistic Name	Low Limit	High Limit	Units
Max Rising Slope (Target=1.3)	0	2.5	Degrees/Second
(Calculate Slope over 20 Seconds)			
Preheat Time 50-120C	90	120	Seconds
Soak Time 120-160C	30	120	Seconds
Time Above Reflow - 217C	60	80	Seconds
Peak Temperature	230	249	Degrees Celsius

Description:

240-270-400 v3

Profiled Using KIC 2000 Technology

KIC
San Diego, CA USA

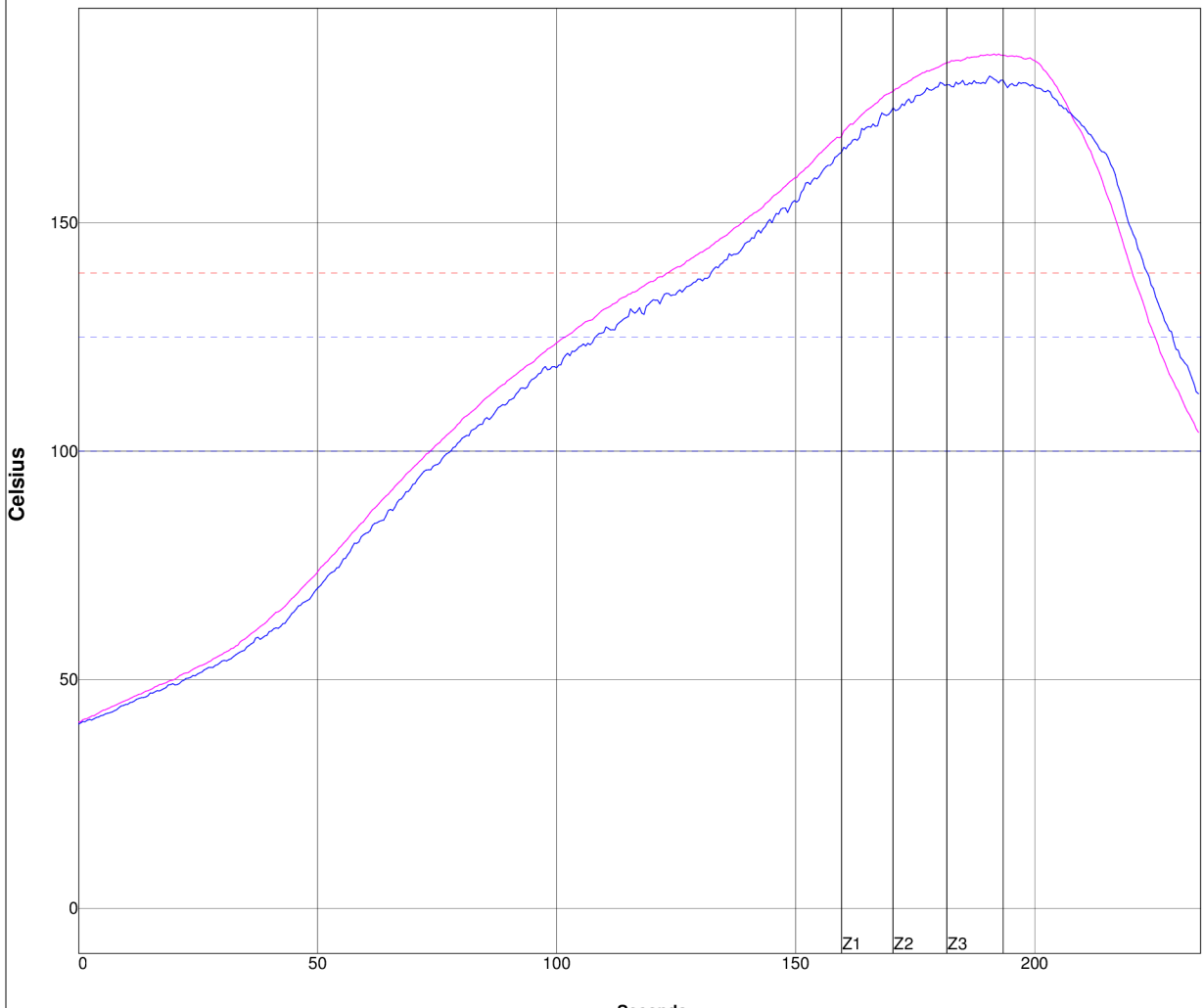
Tel: +1 858 673 6050
Fax: +1 858 673 0085

www.kicthermal.com
tech@kicmail.com

A.3 Teplotní profil 260 220 360 v17

Bedlivy 220301 **Tue Mar 08 2022 16:56:48**

Company: FEKT VUT **Site: Electrotechnology**
Oven Name: DIMA **Process Window Name: INTERFLUX DP 5600**



PWI= 123%	Max Rising Slope		Soak Time 100-125C		Reflow Time /139C		Peak Temp	
R10	1.16	-23%	28.19	-55%	96.98	123%	186.97	80%
R100	1.17	-22%	30.22	-49%	91.44	105%	182.12	47%
Delta	0.01		2.03		5.54		4.85	

Process Window:

Solder Paste: Qualitek 670I Sn42Bi58 NC air or N

Statistic Name	Low Limit	High Limit	Units
Max Rising Slope (Target=1.5)	0	2.5	Degrees/Second
(Calculate Slope over 20 Seconds)			
Soak Time 100-125C	10	90	Seconds
Time Above Reflow - 139C	30	90	Seconds
Peak Temperature	160	190	Degrees Celsius

Description:

260-220-360; v=17

Profiled Using KIC 2000 Technology

KIC
San Diego, CA USA

Tel: +1 858 673 6050
Fax: +1 858 673 0085

www.kicthermal.com
tech@kicmail.com

A.4 Teplotní profil 1260-220-380 v17

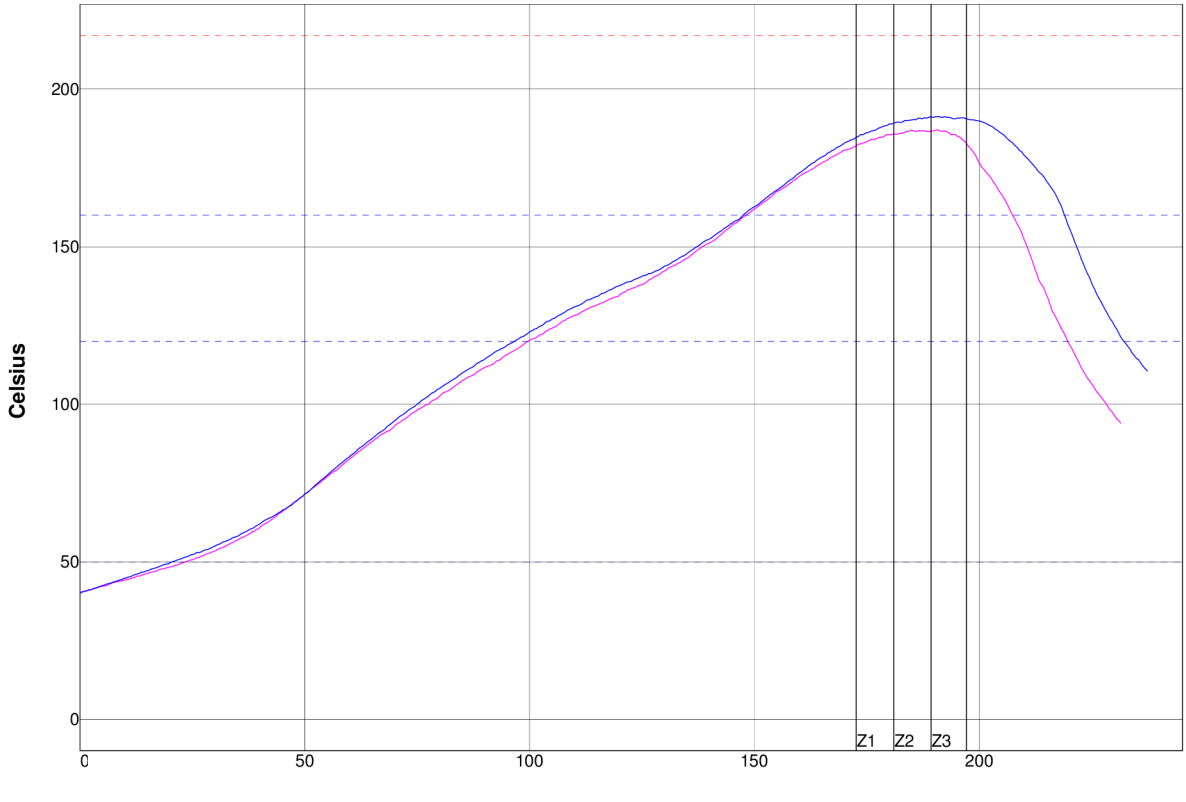
Bedlivy 220301 **Mon Mar 28 2022 17:25:16**

Company: FEKT VUT **Site: Electrotechnology**
Oven Name: DIMA **Process Window Name: SAC305**

Setpoints (Celsius)

Zone	1	2	3
Top	280	260	300
Bottom	280	260	300

Conveyor Speed (cm/min): 16.0



PWI= 700%	Max Rising Slope		Preheat 50-120C		Soak Time 120-160C		Reflow Time /217C		Peak Temp	
R10	1.11	-11%	76.26	-192%	48.45	-59%	0.00	-700%	187.31	-549%
R100	1.17	-7%	76.17	-192%	50.88	-54%	0.00	-700%	191.40	-506%
Delta	0.06		0.09		2.43		0.00		4.09	

Process Window:

Solder Paste: Qualitek DSP 865A Sn/Ag/Cu NC-LF Air/N2

Statistic Name	Low Limit	High Limit	Units
Max Rising Slope (Target=1.3)	0	2.5	Degrees/Second
(Calculate Slope over 20 Seconds)			
Preheat Time 50-120C	90	120	Seconds
Soak Time 120-160C	30	120	Seconds
Time Above Reflow - 217C	60	80	Seconds
Peak Temperature	230	249	Degrees Celsius

Description:

260 220 380 v17

Profiled Using KIC 2000 Technology

KIC
San Diego, CA USA

Tel: +1 858 673 6050
Fax: +1 858 673 0085

www.kicthermal.com
tech@kicmail.com

B Obsah elektronické přílohy

Komprimovaná složka "Testovací deska.zip"- Projekt DPS v návrhovém systému KiCAD 5.