

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE



Diplomová práce

Diploma Thesis

Termomechanické zkoušky pájených spojů

Autor: Bc. Tomáš Beran

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Vedoucí práce: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Tomáš Beran**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Technologické systémy

Název tématu: **Termo-mechanické zkoušky pájených spojů**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s technologií povrchové montáže, zpracujte rešerši týkající se zkoušek pájených spojů. Širší pozornost věnujte termo-mechanickým testům s ohledem na intermetalické vrstvy a tzv. "heating factor".
2. Připravte si sadu vzorků, s různým ohřevem nad teplotou likvidu pájecí slitiny, na kterých provedete termo-mechanické testy.
3. Výsledky termo-mechanických testů vyhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

- [1] Subramanian K.: Lead-free Solders : Materials Reliability for Electronics, 2012, Wiley, ISBN:9780470971826
- [2] Karl J. Puttlitz, Kathleen A. Stalter: Handbook of Lead-free Solder Technology, ISBN: 9780824748708
- [3] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [4] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálů pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Vedoucí: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Ing. Karel Dušek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 16. 3. 2016

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na přetavení pájecí slitiny jednotlivých typů a termomechanické zkoušky závislé na vzniku intermetalických sloučenin doprovázejících heating factor. Teoretická část se zabývá pájecími slitinami, deskou plošného spoje a jednotlivými povrchovými úpravami, vznikem intermetalických vrstev a tzv. „heating factorem“ (plocha u teplotního profilu nad teplotou likvidu). Cílem praktické části je navrhnout desku plošného spoje s různými povrchovými úpravami, následně osázet a přetavit v kombinaci s různými pájecími slitinami. Vzorky jsou následně termo-mechanicky namáhány a podrobovány testům. Cílem je zjistit jak ovlivňuje pájený spoj heating factor, jaký má vliv na růst intermetalické vrstvy a jak se mění mechanická odolnost spojů vlivem termo-mechanického namáhání.

Abstract

This thesis is focused on reflowing of soldering alloy types and thermomechanical tests. During thermomechanical test is examined growth of intermetallic layer together with heating factor. The theoretical part deals with soldering alloys, printed circuit board, intermetallic alloy, formation of intermetallic layers and heating factor. The goal of practical part is creating design of printed circuit board with different surface treatment. The aim is to find how the heating factor affects solder joint, which affects the growth of intermetallic layers. The second part of the practical part is focused on how the thermomechanical stress change mechanical resistance of joints.

Klíčová slova

Pájení, pájecí slitiny, intermetalické vrstvy, heating factor, teplotní profily, mechanické namáhání, termomechanické namáhání.

Key words

Soldering, solder alloy, intermetallic alloys, heating factor, temperature profiles, mechanical stress, thermomechanical stress

Poděkování

Tímto bych chtěl rád poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za jeho profesionální rady, odborné vedení a ochotu se věnovat danému tématu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci pod názvem Termomechanické zkoušky pájených spojů vypracoval samostatně pouze za odborného vedení vedoucího diplomové práce Ing. Karla Duška, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

Tomáš Beran:.....

Obsah

Úvod.....	9
1 Pájení.....	11
1.1 Úvod do pájení.....	11
1.2 Druhy pájení.....	11
1.2.1 Pájení přetavením.....	13
1.3 Technologie, montáž součástek	16
1.3.1 Úvod.....	16
1.3.2 Surface mount technology (SMT).....	17
1.3.3 Through – hole technology (THT).....	18
1.4 Pájka – pájecí slitiny	18
1.4.1 Dělení pájecích slitin teplota přetavení	18
1.4.2 Pájecí slitiny	19
1.4.3 Složení pájecích slitin	19
1.4.4 Jednotlivé složky pájecích slitin nahrazující olovo:.....	20
1.5 Popis vybraných pájecích slitin.....	21
1.5.1 Sn42Bi58.....	21
1.5.2 Sn99,3Cu0,7.....	21
1.6 Deska plošných spojů a povrchové úpravy	22
1.6.1 Povrchové úpravy DPS	22
1.7 Teplotní profil	24
1.8 Podélný teplotní profil	24
1.8.1 Druhy podélných teplotních profilů	25
1.9 Příčný teplotní profil	26
2 Termomechanické zkoušky.....	27
2.1 Termomechanické namáhání pájeného spoje.....	27
2.2 Typy zkoušek pájených spojů	28
2.2.1 Zrychlené testování	29
2.2.2 Tepelné zkoušky	29
2.2.3 Tepelné cyklování	29
2.2.4 Teplotní šok	29
2.2.5 Vibrace.....	29
2.2.6 Mechanický šok	29
3 Intermetalické vrstvy.....	30
3.1 Proces vzniku IMC	30
3.2 Vlastnosti IMC.....	31
3.3 Intermetalické vrstvy různé typy.....	33

3.3.1	Intermetalické sloučeniny Sn – Cu	34
3.3.2	Intermetalické sloučeniny u pájek obsahujících stříbro.....	35
3.3.3	Intermetalické vrstvy u ENIG.....	35
4	Heating factor	36
4.1	Definice heating factoru	36
4.2	Vliv heating factoru na intermetalickou vrstvu	37
4.3	Vliv heating factoru na spolehlivost pájeného spoje	37
5	Praktická část.....	40
5.1	Úvod do praktické části	40
5.2	Návrh desky plošných spojů.....	40
5.3	Výroba vzorků.....	41
5.3.1	Pájecí slitina a osazení.....	41
5.3.2	Přetavení v horkovzdušné peci.....	42
5.4	Teplotní profily přetavení.....	43
5.4.1	Kic profilometr	43
5.4.2	Teplotní profil pro pájecí pastu Sn42Bi58	44
5.4.3	Teplotní profil pro pájecí pastu Sn99,3Cu0,7.....	45
5.5	Metoda testování termomechanických zkoušek	46
5.5.1	Testovací zařízení.....	47
5.5.2	Metodika měření.....	48
5.5.3	Výsledná data	50
5.5.4	Data	50
6	Výsledné data a zhodnocení	52
6.1.1	Názorný průběh testování.....	52
6.1.2	Vypočtené a naměřené hodnoty	53
6.2	Zhodnocení vybraných intermetalických vrstev.....	55
6.2.1	Sn42Bi58 – Cu povrchová úprava.....	55
6.2.2	Sn42bi58 – HAL povrchová úprava.....	56
6.2.3	Sn42Bi58 – ENIG povrchová úprava.....	57
6.2.4	Sn99,3Cu0,7 – Cu povrchová úprava.....	58
6.2.5	Sn99,3Cu0,7- HAL povrchová úprava.....	59
6.2.6	Sn99,3Cu0,7-ENIG povrchová úprava.....	60
7	Závěr.....	61
	Literatura	64
	Seznam obrázků	66
	Seznam tabulek.....	68
	Seznam grafů.....	68

Seznam zkratek a symbolů.....	69
Přílohy.....	70

Úvod

Současný trend v elektrotechnice je spjat s vývojem nových materiálů, technologií a jejich postupným začleňováním. Mezi hlavní charakteristiky těchto změn je dosahování stabilnějších a lepších vlastností výrobků. Hlavním cílem vývoje je dosažení lepší odolnosti proti mechanickým a dalším vlivům, snižování spotřeby, zároveň zvyšování výkonu a celkových účinností. V neposlední řadě je kladen důraz na ekologičnost produktů.

S velkým nárůstem počtu osobních zařízení a jejich nepřetržitým používáním rostou i nároky na výdrž a technické specifikace zařízení. Hlavním trendem je vyšší výkon v menším provedení, což vede umístění součástek do menšího prostoru s využitím lepších chladících technologií, protože toto uspořádání může vést k vyššímu tepelnému namáhání.

Teoretická část se zabývá popisem druhů pájení přetavením, specifikacemi a využitím. Dále je zde popsán rozdíl mezi olovnatou a bezolvnatou pájkou a jejich užití v moderní době. Navazuje popis jednotlivých pájecích slitin využívaných v dnešní době se zaměřením na použití dvou pájecích slitin použitých v této práci. Další část se zabývá povrchovou montáží používané v elektrotechnice pro pájené spoje. Následuje kapitola o povrchových úpravách a jejich využití. U povrchových úprav je popsáno jejich užívání, výhody a nevýhody. Následuje popis pojmu „heating factor“, neboli integrál času nad teplotou přetavení (plocha u teplotního profilu nad teplotou likvidu), který je velice důležitý pro tuto práci, a který je spojen s růstem intermetalických vrstev ovlivňujících strukturu a vlastnosti spojů. Na integrál času navazuje problematika intermetalické vrstvy, kde se definuje co je intermetalická vrstva, jak a při kterých kombinacích povrchových úprav s pájkou vznikají intermetalické sloučeniny. Hlavní částí je růst intermetalické vrstvy v závislosti na heating factoru a její vliv na jakost a spolehlivost spoje.

V praktické části bylo za úkol navrhnut pro testování desku plošného spoje s různými povrchovými úpravami, u kterých se bude posuzovat vliv povrchové úpravy na mechanické zkoušky smykem. Testovací vzorky jsou v kombinaci mimo zmíněné povrchové úpravy také v provedení s dvěma pájecími slitinami, které se přetaví třemi různými teplotními profily. Polovina vzorků byla mechanicky testována při okolní teplotě a polovina při teplotě 65°C, kdy bylo k ohřevu využito infrazářiče. Tímto způsobem byl sledován vliv mechanických vlastností při normálních okolních podmínkách a při podmínkách se zvýšenou teplotou. Následně se přešlo k vyhodnocování tloušťky intermetalických sloučenin na mikro výbrusu pomocí mikroskopie a obrazové analýzy. Tloušťka intermetalické vrstvy byla hodnocena s ohledem na velikost heating factoru při jednotlivých zkoumaných kombinacích.

Vyhodnocení má za cíl zjistit vliv mechanické pevnosti na kombinaci povrchové úpravy s pájecí pastou a teplotními profily. Dále pak určit rozdíly mezi mechanickým a termomechanickým namáháním. A na závěr zhodnotit růst a vliv intermetalických vrstev na zkoumané vzorky.

1 Pájení

1.1 Úvod do pájení

Pájený spoj je nerozebíratelné spojení dvou, či více částí pomocí přídavného materiálu pájky (pájecí slitiny). Pájení je tedy technika spojování kovů pomocí tavící slitiny, která má nižší teplotu tavení než spojované části. Pájení lze také definovat jako spojování kovů, přesněji jako metalurgické spojování dvou kovů pomocí třetího tzv. pájky nebo pájecí slitiny. Při procesu pájení dochází ke vzniku vazby mezi atomy, dva volné povrchy jsou nahrazovány jedním. Tento povrch je charakterizován nízkou volnou energií. Atomy taveniny jsou na povrchu tuhého kovu uspořádány krystalograficky¹. S rostoucím teplem se zvyšuje pohyb atomů a zároveň jejich difuze zesiluje vazby a po procesu přetavení se ve fázi chladnutí pomocí krystalizace upevňují dříve probíhající jevy. [11]

Proces pájení je znám už tisíce let a za tu dobu prošel výraznými proměnami, zdokonaleními a vývojem. V průběhu tohoto vývoje se vyvinuly nové metody pájení, vznikly nové druhy slitin a pájek s řadou specifických vlastností pro různé aplikace. To vedlo k rozšíření použití pájek do všemožných odvětví. Nejvíce jsou zastoupeny hlavně v těchto oblastech:

- Elektrotechnický průmysl
- Energetický průmysl
- Strojírenský průmysl
- Vojenský průmysl a další

Rozšíření pájení do těchto a dalších nových směrů vedlo k velkému posunu technologie pájení a s ní spojenou problematikou.

1.2 Druhy pájení

Pájení lze rozdělit do dvou základních kategorií a to pájení ruční a strojní.

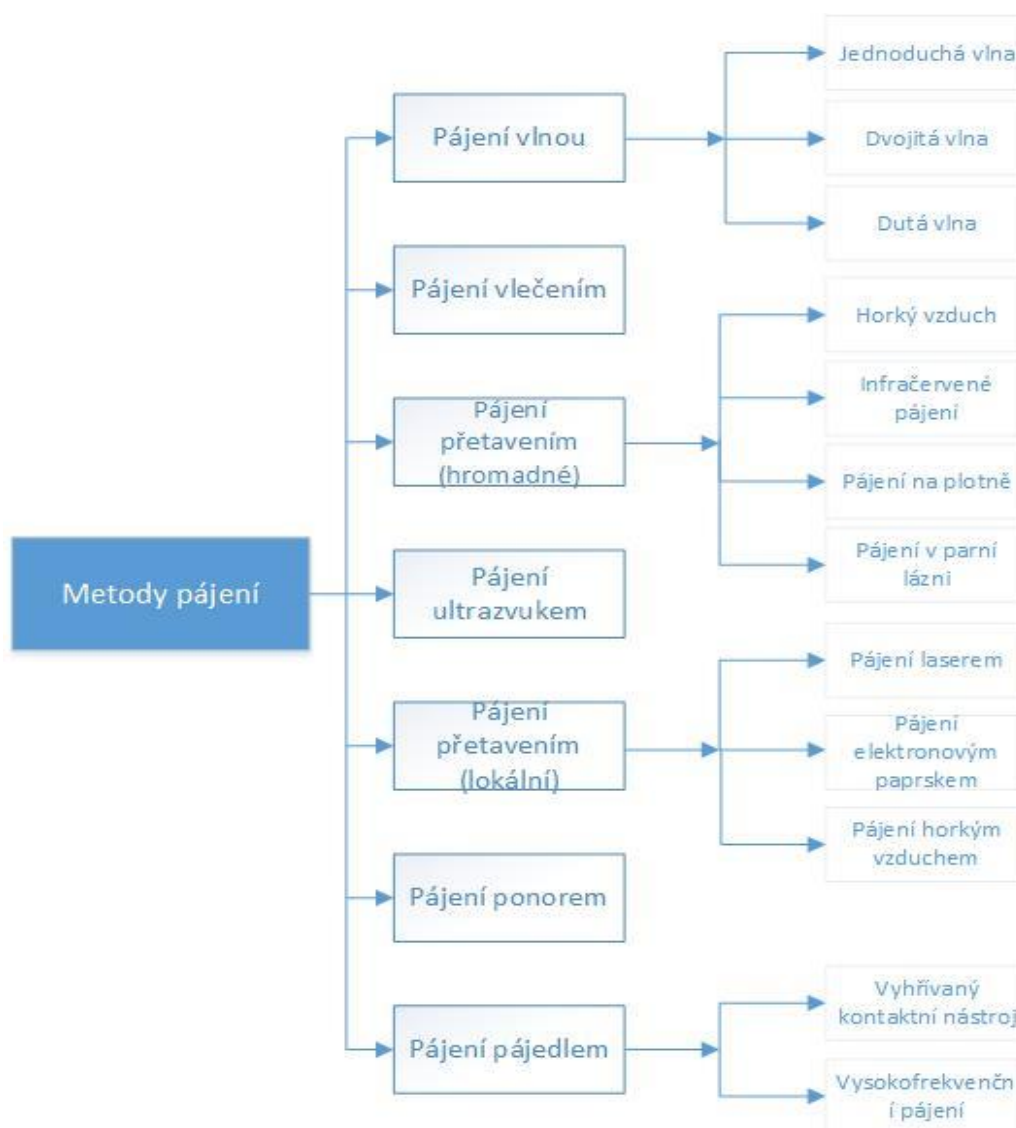
Ruční pájení se využívá většinou u pájení specifických součástek netradičních tvarů, při opravách osazených desek, nebo při konečném osazení, díky tomu, že některé součástky nesnesou teplotu přetavení celé desky a musí tedy být zapájeny až na konci procesu. [12]

¹ Uspořádání struktury krystalů

Strojní pájení je v dnešní době nejpoužívanější při výrobě velkých sérií výrobků. Je využito pro svoji vysokou rychlost, reprodukovatelnost, spolehlivost a nízké celkové náklady vztažené na jednotku výrobku.

Existuje velké množství technologických procesů, které se zabývají pájením součástek. Odlišují se od sebe typem přenosu energie k pájenému spoji. Na obrázku č. 1 je schematicky znázorněn přehled typů základních pájecích technologií včetně podrobnější kategorizace. Přičemž v praxi, u specifických aplikací, lze narazit na další možné pájecí technologie.

Popis všech technologií pájení a jejich detailnější rozbor je nad rámec této diplomové práce. Z následujícího diagramu je na dalších stránkách detailněji popsán jeden technologický postup pájení a to pájení přetavením. Pájení přetavením bylo vybráno pro popis díky faktu, že je v praktické části této diplomové práce použito.



Obr. 1- Schematický přehled typů pájecích technologií

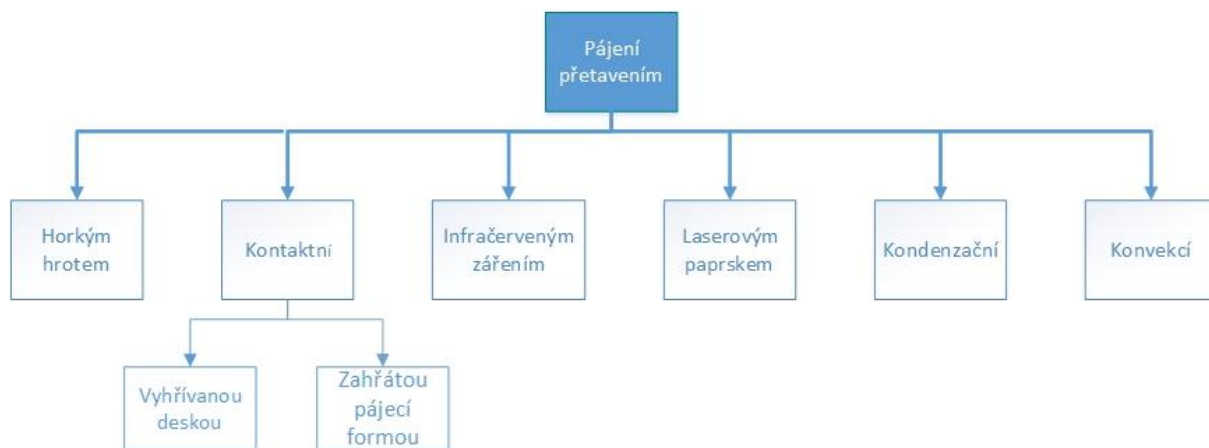
1.2.1 Pájení přetavením

Pájení přetavením patří v elektrotechnice k jedné z nejpoužívanějších metod pájení. Tato metoda se používá pro hromadné i selektivní pájení. [13]

Při této metodě dochází nejprve k nanesení pájecí pasty na desku plošného spoje (či na jiný pájený materiál). Pájecí pasta je nanášena sítotiskem pomocí šablony, nebo dávkovačem (dispečerem) podle specifikací aplikace. Následně jsou na nanesenou pájecí pastu osazeny součástky. Po tomto kroku dochází k zahřátí osazené DPS a k přetavení pájecí pasty. Teplota přetavení by měla být nastavena tak, aby byla vždy vyšší, než je teplota tavení dané pájecí slitiny.

Mezi hlavní výhody této technologie patří schopnost nanášet pájecí pastu šablonovým tiskem či sítotiskem, pro velké množství součástek. Dále je výhodné nanesení definovatelného množství pájecí slitiny a tavidla, které lze měnit velikostí otvorů a tloušťkou šablony, či dávkovačem, kde šablonou se dosahuje vyšší přesnosti dávkování. Mezi výhody patří vycentrování součástek v průběhu přetavení (tzv. self alignment effect) vlivem povrchového napětí.

Na následujícím obrázku (obr. 2) je rozepsaná struktura pájení přetavením s jednotlivými vybranými způsoby (způsobů může být více např.: pájení plamenem, indukci atd.).



Obr. 2 - Schéma metod pájení přetavením

V následujícím textu jsou popsány pro upřesnění jednotlivé metody pájením přetavením. Důraz je hlavně kladen na metodu konvekcí horkým vzduchem, jelikož tato metoda přetavení je použita při praktické výrobě vzorků uvedených v praktické části v laboratorním zařízení v peci.

1.2.1.1 Přetavení konvekcí

Tento způsob přetavení je čím dál více využívaný. Jeho základ je založen na šíření tepla proudem ohřátého plynu pomocí trysek. Energie na přetavení je dodávána plynným médiem. Může to být vzduch, dusík nebo vodík. Celkové zařízení je konstruováno jako průběžná pec s dopravníkem. Deska plošného spoje je unášena lineárním dopravníkovým pásem skrz zóny v peci. Průchod pájecího procesu je řízen několika teplotními zónami, většinou bývají čtyři. [5] [12]

První zónou je zóna předehřevu, kde se předchází tepelnému šoku součástek. V této zóně také dochází k odpařování rozpouštědel. Další zóna slouží k dalšímu předehřevu součástek a pájky a hlavně k odpaření zbytku rozpouštědel a k aktivaci tavidla, které je pro správně zapájený spoj důležité. V třetí zóně dochází k vlastnímu přetavení, kde by měla být teplota nastavena cca 20 °C nad (u některých pájecích slitin i více) teplotou tavení pájky. V poslední zóně dochází k ochlazení součástek a spoje. Tato zóna je velice důležitá, protože v ní dochází k správnému poklesu teploty důležitému pro ztuhnutí a k správnému dokončení zformování struktury spoje. Výhodou je, že lze korigovat rychlost dopravníkového pásu a jednotlivé tepelné zóny předehřevu a přetavení. Mezi další výhody patří možnost změny směru proudění pomocí trysek a dochází k rovnoměrnějšímu ohřevu celé desky.[13]

1.2.1.2 Přetavení infračerveným zářením

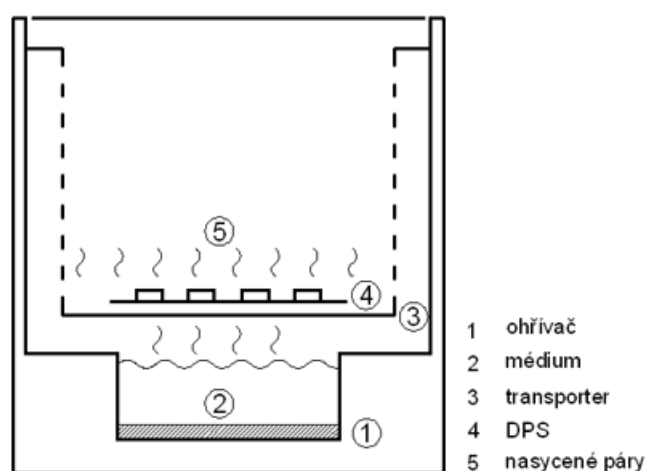
Metoda za pomoci infrazářiče se velmi podobá metodě konvekcí. Deska plošného spoje prochází také pecí, jediný rozdíl je, že se zde nerozvádí ohřáté médium v podobě plynu, ale jsou zde použity infrazářiče. Tato metoda je výhodná pro velkosériovou výrobu. „*Nevýhodou je pohlcování vyzářené energie tmavými povrchy součástek a s tím spojená možnost lokálního přehřátí pájené desky*“ [13].

1.2.1.3 Přetavení laserovým paprskem

Technologií laserového paprsku lze docílit přesnou lokalizaci a dávkování tepla na přesné místo. Pájené plošky se zahřívají na krátkou dobu, díky této technologii nedochází k nadbytečnému ohřívání součástky a částí kolem ní. Díky tomu lze používat bodově vysoké teploty pájení. Mezi nevýhody patří velmi vysoká pořizovací cena, tudíž se používá jen u velice choulostivých součástek, kde by chyba v dávkování tepla stála velké náklady na náhradu součástek. Tento způsob je vhodný pro speciální aplikace. Nevýhodou je, že touto technologií nelze pájet některé typy součástek, kdy se laser nedostane pod pouzdro součástky. [13][14]

1.2.1.4 Přetavení kondenzační (v parách)

Metoda kondenzační nebo tzv. pájení v parách využívá k ohřevu teplo uvolněné fázovým přechodem teplotnosného média z plynné do kapalného stavu. Jako teplotnosné médium se užívá pájecí kapalina na bázi fluorovaných uhlovodíků nebo např. perfluoropolyetheru (PFPE). Osazená deska se ponoří do nasycených par. Ke kondenzaci dochází na chladnějším povrchu montážního celku, kdy se při tom uvolňuje tepelná energie, která montážní celek ohřívá. Kromě kondenzace ohřívají celek i samotné páry. Poté dochází k přetavení pájky až do bodu varu pájecího média. Výhoda této technologie je, že nedochází k přehřátí montážního celku. Je vhodná pro osazování BGA(ball grid array) pouzder a dochází k pájení bez přítomnosti kyslíku, který je párami vytlačován mimo oblast pájení. [13]



Obr. 3 - Kondenzační pájení schéma [17]

1.2.1.5 Přetavení kontaktní pájení

Vyhřívanou deskou

Celek sestavy pro zapájení se umístí na vyhřívanou desku a zahřeje se na teplotu tavení pájky. Po docílení teploty roztavení pájky se tato sestava sejme z vyhřáté desky a nechá postupně vychladnout pro správné ucelení spojů. Tato metoda se používá pro keramické substráty, jelikož se celý substrát musí ohřát na teplotu tavení pájky. Za nevýhodu se dá považovat jednostranné osazení plošného spoje součástkami a tím pádem nižší využitá plocha.[13]

Zahřátou pájecí formou

Proces pájení, který vyžívá speciální formou. Pro každý typ desky plošného spoje se nejprve musí vytvořit forma s tvarovanými výstupky. Výstupky tlačí na vývody součástek a přitlačují je k plošnému spoji. Celá tato sestava se zahřeje odporově. Teplo se tedy přeneše pomocí výstupků na kontakty a zahřeje pájku až do bodu tavení. Po dostatečném roztavení se ohřev vypne a následně se po vychladnutí pájených spojů forma odstraní. Tímto postupem lze zapájet součástky, které mají tendenci pružit. Součástky s nestandardním tvarem je nutné většinou ručně dopájet. [12]

1.3 Technologie, montáž součástek

1.3.1 Úvod

S technologií pájení je úzce spjat druh montáže plošného spoje. Druh montáže má zásadní vliv na způsob pájení. Typů pájecích technologií je řada, mezi nejvýznamnější patří:

- ruční pájení páječkou,
- tekuté pájení (vlnou),
- přetavením (reflow).

Každá z těchto technologií je vhodná pro jinou povrchovou montáž a pro odlišnou aplikaci. Každá technologie má své výhody i nevýhody, rozhodujícím faktorem pro rozhodování o výběru typu montáže a pájení je oblast použití a použité materiály (materiály součástek, pájecích slitin).

1.3.1.1 Montáž součástek

V elektrotechnice je montáž součástek na desku plošného spoje (dále jen DPS) proces, při kterém se spojují vývody nebo kontaktní plošky součástek s vodivými cestami na této desce. Základními typy vývodů jsou:

- Bezvývodové součástky
- Vývodové součástky

Z toho vyplývají typy povrchové montáže:

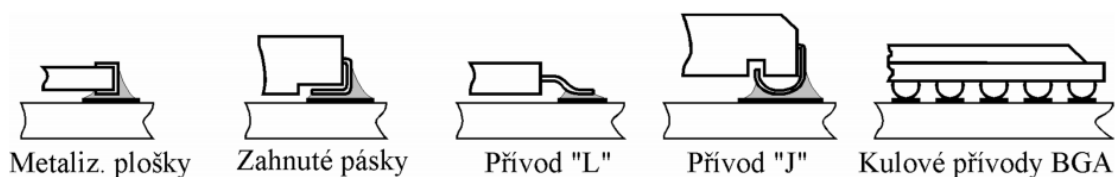
- SMT – Surface Mount Technology (povrchová montáž)
- THT – Through Hole Technology (vsazová montáž)

1.3.2 Surface mount technology (SMT)

Povrchová montáž SMT je technologie progresivního propojování součástek na povrchu DPS. Je to nejdůležitější technologie povrchové montáže, součástky jsou montovány přímo na povrch, na vodivé cesty. Pájení je tedy provedeno pouze na vnější stranu spoje. Hlavní výhodou je schopnost osazovat součástky z obou stran DPS, tím pádem vzniká větší užitečná plocha. Vzniká tedy menší a kompaktnější obvod. Finální výrobek je tedy menší, kompaktnější, lehčí, časově a finančně méně náročný na zhotovení.

Vývodové součástky mají vývody zahnuté do roviny rovnoběžné se spodní plochou pouzdra ve dvou variantách a to ve tvaru písmene J (pod pouzdro) nebo ve směru od pouzdra tvar písmene L (na následujícím obrázku č. 4 jsou zobrazeny). Bezvývodové součástky mají vytvořené kontaktní plošky přímo v rovině pouzdra, rozmístěné po obvodu pouzdra, nebo rozmístěny na spodní straně s kuličkami z pájky (BGA pouzdra). Součástky lze osazovat z obou stran z toho plyne vysoká hustota osazení součástek. Součástky jsou dodávány dle potřeby v zásobnících. [16][10]

Příklady tvaru vývodů:



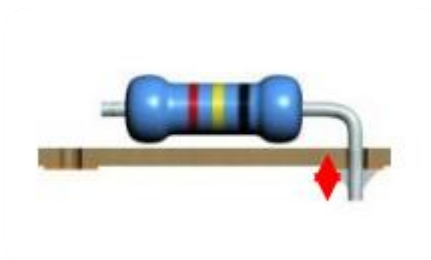
Obr. 4- technologie SMT příklady usazení součástek [10]

Na názorném obrázku č. 4 jsou znázorněny vývody a jednotlivé možnosti usazení součástek u technologie SMT.

Tato technologie montáže disponuje efektivnějším osazením plochy, vysokou automatizací, rychlejší produkcí a efektivnější výrobou. Mezi další výhody patří: vyšší spolehlivost, samo vyrovnání při přetavování, velká přesnost, nižší počet chyb a lepší mechanická odolnost vůči otřesům než u technologie THT.

1.3.3 Through – hole technology (THT)

Technologie vsazová (THT) je druhým typem montáže. Představuje montáž s osazováním vývodových součástek do předem vytvořených děr v DPS a následným zapájením z druhé strany desky. Vývodové součástky jsou často v dvojřadovém vyhotovení vývodů DIP – Dual IN Line package. Vývodové součástky jsou osazeny do otvorů v DPS a následně jsou jejich vývody zapájeny k pájecím ploškám. Rozstup vývodů záleží na typu pouzdra (např. DIP 2,54mm). [16][10]



Obr. 5 – montáž THT [7]

1.4 Pájka – pájecí slitiny

Pájky se mohou rozdělovat podle teploty přetavení, nebo podle materiálu pájecích slitin. V prvním zmíněném rozdělení rozdělujeme pájky na měkké, nebo tvrdé. Jejich popis bude upřesněn v následujícím textu. V druhém dělení lze pájecí slitiny rozdělovat podle použitých nakombinovaných materiálů na olovnaté a bezolvnaté (lead free) pájky.

1.4.1 Dělení pájecích slitin teplota přetavení

1.4.1.1 Měkké pájky

Měkká pájka je slitina dvou a více kovů s různým poměrem složek. Za měkké pájky označujeme ty, které mají bod přetavení do 450°C. Označované měkké pájení je tedy pájení s nízkou teplotou tavení oproti tvrdým pájecím slitinám. Většinou to jsou slitiny kovů olova, kadmia, cínu, zinku, stříbra a další. Jejich pevnost v tahu je do 80 MPa a pevnost ve stříhu do 50 MPa. [12]

Použití zmíněného olova bylo zamezeno evropskou směrnicí RoHS (směrnice Evropského parlamentu a rady 2011/65/EU), která omezuje používání některých látek (Olovo, Kadmium, Rtuť, šestimocný chrom, Polybromované bifenyly, Polybromované difenylethery) ve výrobě elektrických a elektronických zařízení a tím omezit dopad na lidské zdraví a na životní prostředí. [11]

1.4.1.2 Tvrdé pájky

Tvrdé pájky jsou charakterizovány teplotu tavení nad 450°C. Využívají se slitiny, nebo čisté kovy. Pro čisté kovy platí, že se používají výjimečně pro pájení ve vakuu, jsou to např. měď, stříbro, zlato, paladium. [15]

U pájení v atmosféře se používají slitiny např. ze stříbra, zlata, niklu, zinku, mědi a dalších. Pracovní teplota tvrdých pájek je nad 700°C. Pevnosti spojů zmíněných u předchozí kategorie jsou pevnost v tahu až 400MPa a ve střihu 100 – 300 MPa.

1.4.2 Pájecí slitiny

Pájky neboli pájecí slitiny jsou základním kamenem pro vytváření pájených spojů. Podle typů se mohou vlastnosti spoje jak mechanické tak vodivostní výrazně lišit. Lze je rozdělovat do dvou základních typů a to olovnaté a bezolovnaté. Klasická olovnatá pájka Sn63Pb37 byla nahrazena bezolovnatými pájkami, kvůli škodlivým vlivům olova. V následujícím textu budou popsány výhody a nevýhody těchto dvou skupin. Následně budou podrobněji popsány slitiny, které jsou použity v praktické části této diplomové práce.

1.4.3 Složení pájecích slitin

1.4.3.1 Olovnaté pájky

Olovnaté pájky jsou slitiny olova a cínu a řadily se mezi nejrozšířenější pájky v elektrotechnickém odvětví. Nejvíce zastoupený poměr složek u této slitiny byl v rozmezí 60% – 65% u cínu a 35 – 40% pro olovo. Nejpoužívanější olovnatá pájecí slitina je nazývána také jako eutektická, která má zastoupení složek je 63% cínu a 37% olova (Sn63Pb37). Název eutektická je uváděn proto, že má tato kombinace eutektický bod, tedy bod, při němž je teplota tání nižší než teplota tání jednotlivých samotných složek. Tato pájka je charakteristická svojí nízkou teplotou tání, která je 183°C. [18]

Slitina cín – olovo je specifická svým rychlým přechodem z kapalné do tuhé fáze. Pájený spoj má dobré vodivostní a mechanické vlastnosti, protože nedochází k tvorbě dutých struktur. Pro elektrotechnický průmysl je především vhodná díky rozpustnosti.[11]

Olovnaté slitiny patřily k nejrozšířenějším typům pájek používaných v elektrotechnice, ale díky ekologickým aspektům byly směrnici RoHS (Restriction of the use of certain hazardous substances in electronic equipment) staženy z průmyslové výroby a jsou v dnešní době využívány pouze pro specifické účely ve vojenství, nebo pro výzkumné účely.

1.4.3.2 Bezolovnaté pájky

Jako náhrada za hojně využívanou olovnatou pájku přišly bezolovnaté pájky tzv. „*Lead Free solders*“. Hlavní cíl, který je kladen na bezolovnaté pájky je nahradit ekologicky nešetrné olovnaté pájky a dosáhnout podobných nebo lepších vlastností. Na bezolovnaté pájky jsou kladeny tedy specifické požadavky na elektrickou a tepelnou vodivost, mimo to na dobrou smáčivost bezolovnatých pájecích slitin a samozřejmě také na mechanickou pevnost. Z toho vyplývá několik kritérií pro výběr pájecí slitiny do praxe. Mezi základní kritéria patří fyzikální, mechanická, environmentální a ekonomická kritéria a pájitelnost.. [15]

Převážně se bezolovnaté pájky vyskytují s minimálně 60% cínu, zbytek je tvořen převážně drahými kovy. Od toho se odvíjí jejich cena, která je závislá na ceně jednotlivých složek. Ve většině případů je vyšší než cena klasické olovnaté pájky. Důležitým aspektem, který musí bezolovnatá pájka dodržet je nízká teplota tavení. Olovnatá pájka má teplotu tavení cca 183°C, proto je kladen velký důraz na nízkou teplotu tavení i pro bezolovnaté pájky, aby se předešlo poškození součástek a nosných ploch při přetavení. Většina bezolovnatých pájek má teplotu tavení vyšší mezi 190°C – 230°C podle zastoupení jednotlivých složek. Z tohoto důvodu je důležité pro úspěšné nahrazení olovnatých pájek pájkami bezolovnatými zohledňovat možnosti volby součástek, povrchových úprav a odolnost vůči teplotě základního materiálu. [15]

1.4.4 Jednotlivé složky pájecích slitin nahrazující olovo:

Měď (Cu) – v elektrotechnice velice používány prvek. Používá se pro svoji mechanickou pevnost a dobrou smáčivost povrchu. Zvyšuje bod přetavení. [16]

Stříbro (Ag) – je drahý kov, který je používán pro své dobré elektrické vlastnosti, dále snižuje bod tání a zlepšuje smáčivost. Používá se také pro zvýšení pevnosti spoje. V pájeném spoji tvoří intermetalickou sloučeninu, která se po ztuhnutí nerozpouští. Snižuje difúzi ušlechtilých kovů a způsobuje zrnitost struktury. [16]

Cín (Sn) – nejvíce používaný prvek v problematice pájení. Ve slitinách je většinou zastoupen 60% a více procenty. Je to nízko tavitelný kov, proto snižuje tání pájky. Zvětšuje křehkost pájených spojů. [16]

Bismut (Bi) – zvyšuje křehkost spoje a snižuje bod tání. Tento prvek má nízkou cenu, která je ale vykoupena za toxicitu olovem, z důvodu jeho získávání.[16]

Indium (In) – je využíváno pro svoji dobrou smáčivost povrchu a pro snížení bodu tání slitiny. Má horší mechanické vlastnosti a nevýhodou je i vysoká cena, která je vyšší než u stříbra. [16]

Nikl (Ni) – používá se proti difuzí povrchových úprav, zabraňuje odmaštění. Zlepšuje mechanické vlastnosti spojů. [16]

Antimon (Sb) – využíván pro zlepšování pevnosti a snižování povrchového napětí. Je užit v různých slitinách díky své odolnosti proti chemickým vlivům. [16]

Zinek (Zn) – má nízký bod tavení a jeho cena je také nízká. Jeho nevýhodou je, že zhoršuje smáčivost a zvyšuje oxidaci povrchu. [16]

Germanium (Ge) – využíváno proti oxidaci. [16]

1.5 Popis vybraných pájecích slitin

1.5.1 Sn42Bi58

Cín - bismutová pájecí pasta Sn42Bi58 je typickou pastou pro nízkoteplotní pájení. Tato slitina je tvořena z 42% cínem a z 58% bismutem. Pracovní teplota se dá kategorizovat do teploty přehřevu, který se nachází mezi 90°C do 110°C. Tavicí bod této slitiny je okolo 138°C (záleží na okolních podmínkách). Přetavovací teplota je určena od 150°C do 100°C. Tato slitina má dobré elektrické vlastnosti a také dobré vlastnosti proti termické únavě.[19]

Výrobci této pasty udávají, že je vhodná pro opravy a pro zapájení malých elektronických součástek ideálně se využívá pro DPS, SMT a plug-in komponenty do základních desek počítačů, telefonů a také pro zařízení s LED obvody. [19]

1.5.2 Sn99,3Cu0,7

Jedna z alternativ nahrazující cín-olovnatou pájecí slitinu. Je to binární slitina cínu a mědi, kde cín je zastoupen 99,3%, měď je zastoupena 0,7% (většinou se značí následovně Sn99,3Cu0,7). Toto zastoupení je nejpoužitelnějším typem z této kombinace prvků s bodem tání 227 °C. Je vhodnou náhradou pájecích slitin díky svému poměru cena/vlastnosti. Vyznačuje se svými dobrými únavovými vlastnostmi. [20]

Další hojně používaným typem je Sn100C. Má stejný bod tavení a skládá se ze stejného procentuálního zastoupení složek cínu a mědi, ale obsahuje velmi malé množství germania a niklu. Výhodou je nižší agresivita vůči nerezovým ocelím. Vytváří rovnoměrně intermetalickou vrstvu a pájené spoje jsou hladké, lesklé a dobře tvarované. [20]

1.6 Deska plošných spojů a povrchové úpravy

Deska plošného spoje (dále jen DPS) se používá pro mechanické připevnění součástek a pro vodivé propojení elektronických součástek. Základní materiál desek je převážně skelný laminát ze skelné tkaniny sycený epoxidovou pryskyřicí označuje se FR4. Vodivé cesty pro součástky jsou vytvořeny odleptáním měděné folie na tuto izolační laminátovou desku. Plošné spoje jsou dělány podle potřeby povrchové montáže SMT nebo THT buď jedno vrstvé, dvou vrstvé nebo vícevrstvé. Vícevrstvé plošné spoje jsou slepeny z několika dvou vrstevých DPS, u kterých se musejí prokovovat průchody mezi vrstvami.

Výroba DPS se uskutečňuje z různých materiálů s různými provedeními. Většina jich je vyrobena ze sklené tkaniny sycené epoxidovou pryskyřicí, jak již bylo zmíněno. Pro jednodušší výrobky se používá laminát se základní vrstvou z tvrzeného papíru. Pro vysokofrekvenční aplikace je používán laminát na bázi teflonu nebo keramiky. U výkonových obvodů se nejčastěji setkáme s materiálem s kovovým substrátem, který má za funkci odvod tepla.[16]

Základní typy a označení materiálů DPS:

- FR1 – papír nasycený fenolovou pryskyřicí – je levný
- FR2 – papír nasycený fenolovou pryskyřicí – standardní, nehořlavý, používá se ve spotřební elektronice
- FR3 – papír nasycený epoxidovou pryskyřicí – má dobré elektrické vlastnosti, obsahuje látky zpomalující hoření, dobrá mechanická vlastnost
- FR4 – tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí – nejčastější použití, nehořlavá
- FR5 – stejný typ jak FR4 vynikající tepelná odolnost

1.6.1 Povrchové úpravy DPS

Cílem povrchových úprav DPS je dobrá smáčivost, odolnost proti korozi, zajištění dlouhodobé skladovatelnosti a dobré pájitelnosti pájecích ploch pro součástky použité k osazení DPS. Zajištění těchto vlastností lze docílit různými metodami. Nejčastěji se však používají pokovovací metody a pokrývání měděných ploch DPS organickými povlaky. Povrchové úpravy musí vyhovovat požadavkům povrchové montáže. [16]

- Cínování za tepla
- Tisk pájecí pasty
- Elektrolytické cínování

1.6.1.1 HASL (Hot Air Solder Leveling)

Jedná se o metodu, při které je DPS ponořena do roztavené cínové pájky a při pohybu zpět je ofukována vzduchovými noži tak, aby pájka byla vyfouknuta z otvoru a z povrchu nepájivé masky. Dnes je používána bezolovnatá pájka, která vyhovuje směrnici RoHS, ale může obsahovat různé slitiny s příměsemi jako je např.: cín-stříbro-měď, cín-měď, cín-měď-nikl a další. Tento povlak chrání měděný povrch před oxidací. Struktura a tloušťka povrchu je závislá na povrchovém napětí pájky. Mezi přednosti metody HASL patří výborná pájitelnost, dlouhá skladovatelnost a možnost vícenásobných teplotních cyklů. Nevýhody HASL jsou velká energetická náročnost procesu, zátěž velkými teplotami a nerovnost povrchu. Zvláště ponor znamená pro desku velký teplotní šok, který může způsobit ohýbání a kroucení desky.[21]

1.6.1.2 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)

Povrchová metoda, kterou se nejprve nanese chemicky sloučenina niklu (3-6um) a poté se na tuto vrstvu nanese imerzně zlato. Zlato je naneseno pro finální krytí desky plošného spoje z chemického hlediska je ideálním prvkem, jelikož zlato netvoří oxidy, je vhodné pro skladovací podmínky, které s teplotou nemají praktický vliv na životnost spoje. Tato povrchová úprava se tedy vyznačuje výbornou smáčivostí (zlato se okamžitě rozpouští do pájky), výbornou rovinností povrchu a pájitelností. Mezi nevýhody patří dražší výroba a výskyt tzv. „Black Pad“[21]

1.6.1.3 OSP (Organic Surface Protectives)

Metoda chemického nanášení organických inhibitorů oxidace mědi na povrch desky plošného spoje. Tato metoda se nejvíce využívá pro jednostranné desky. Dosahuje dobré pájitelnosti, rovinnosti povrchu oproti metodě HASL a její cena je nižší až o 30 – 40% oproti HASL. Nevýhodou je snížení pájitelnosti a doba skladovatelnosti při vícenásobných teplotních cyklech a rozdílnost vlastností povrchů od výrobců.[21]

1.6.1.4 Imerzní cín

Jde o nanášení povrchu chemickou cestou. Deska se ponoří do roztoku chemického cínu. Tento postup je cenově dostupný. Nejlépe smáčivý je cínovou pájkou. [21]

² Black Pad = černá kontaktní ploška, při ní se oddělí pájený spoj od vrstvy niklu

1.7 Teplotní profil

Pro spolehlivé formování pájeného spoje je důležitým parametrem správně nastavení teplotního profilu, neboli průběhu teploty v závislosti na čase. Teplotní profil musí být nastaven správně podle použité pájecí pasty, součástek, desky plošného spoje a dalších důležitých parametrů. Je to jedna ze základních věcí, které se musí správně nastavit, aby pájený spoj a celý výrobek byl vyráběn s požadovanou kvalitou. *Jednotliví výrobci pájecích past udávají doporučený teplotní profil, aby docházelo k správnému přetavení, dobrému působení tavidel, správného účinku aktivátorů a dobrému odpařování rozpouštědel*. [11] U špatného nastavení *„může docházet k nadměrnému teplotnímu namáhání ostatních součástek, ale i desky plošného spoje, kde pak následně hrozí postupná degradace nebo zničení. Důsledkem musí být investice do nových lepších zařízení, které jsou přesnější a mají více přetavovacích zón“*. [11]

Teplotní profily se dají rozdělit na dva základní druhy. První z nich je tzv. „*podélný teplotní profil*“, který se dá rozdělit na lineární a sedlový průběh. Druhý se nazývá tzv. „*příčný teplotní profil*“ v následujícím textu budou probrány.

1.8 Podélný teplotní profil

Podélný teplotní profil udává závislost teploty na čase při průchodu pájeného spoje přetavovací pecí. Lze rozdělit na čtyři části, kdy každá část má důležitou roli pro formování kvalitního spoje. Tyto oblasti se nazývají: [14]

- Oblast předeřevu
- Oblast předeřevu vyrovnání
- Oblast přetavení
- Oblast chlazení

1) Oblast předeřevu – teplota do 150°C (podle pájecí pasty)

V této oblasti dochází k odpaření rozpouštědel z pájecí pasty. Při zhruba teplotě 100°C dochází k měknutí látek, pokud nastane příliš rychlý nárůst teploty, nemusí dojít k dostatečnému odpaření rozpouštědla a může dojít k vodnatosti pájecí pasty a tím docházet k defektům. [4][5]

2) Oblast vyrovnání

Dochází k distribuci tepla po desce a k úplnému odpaření rozpouštědla. Tavidlo v tomto bodě je tekuté a obaluje se kolem částic pájky a pájeným bodem, nedochází k oxidaci. Také se aktivují aktivátory, které napomáhají k odstranění oxidů z povrchu částiček pájky a povrchu kontaktní plošky [4][5]

3) Oblast přetavení

V této oblasti dochází k úplnému přetavení pájecí pasty. Tato oblast je nastavena na teplotu nad tavicí teplotu pájky. Dochází k odstranění oxidů a k vytvoření vazeb mezi pájeným povrchem, pájkou a součástkou. [4][5]

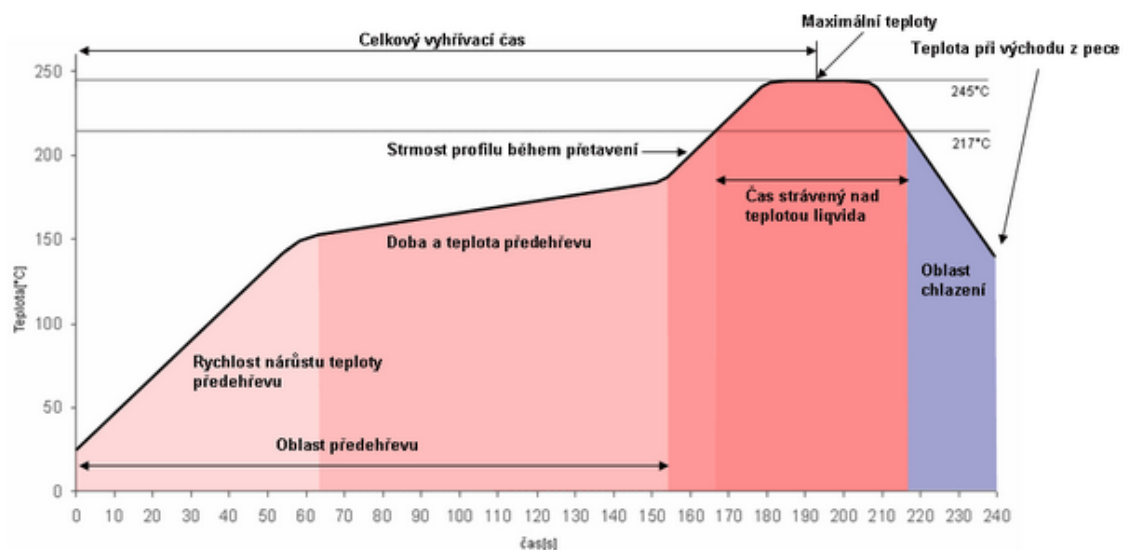
4) Oblast chlazení

Neméně důležitá fáze přetavovacího procesu. Dochází zde k tuhnutí a k zformování výsledného spoje. Je také důležitá pro chlazení součástek. Při rychlém chladnutí dochází k tepelnému šoku, který může mít za následek negativní účinky na výsledný výrobek. [4][5]

1.8.1 Druhy podélných teplotních profilů

1.8.1.1 RSS

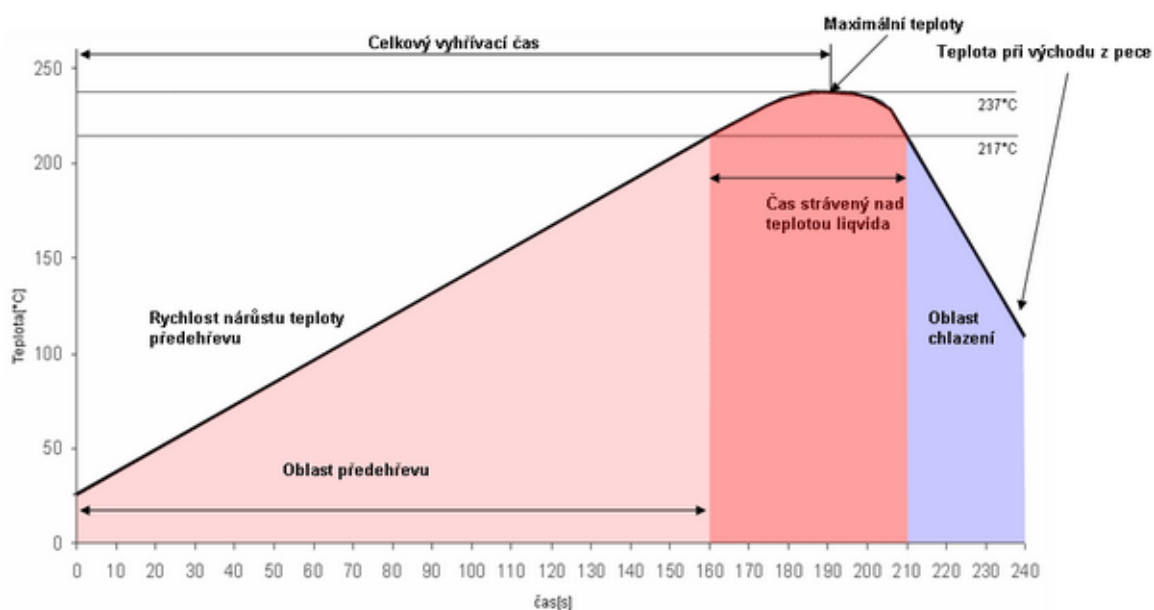
„*Ram Soak Spike*“ teplotní profil sedlového typu. Využíván pro mírně aktivovaná nebo bezplachová tavidla. Dochází u něho k předčasnému působení tavidla, které následně vede k nižší smáčivosti během dalších fází přetavení. Jeho výhodou je eliminace tepelného šoku pro součástky a desku plošného spoje. [17]



Graf 1 –teplotní profil sedlového typu [17]

1.8.1.2 RTS

„Ramp to spike“ profil, kde dochází k lineárnímu růstu teploty až k nastavené cílené teplotě. RTS je oproti RSS vhodný pro vodou rozpustné pájecí pasty. RTS profil má oproti předešlému profilu vliv na menší počet závad týkajících se pájitelnosti u pájených spojů a má vliv na vzhled spojů, které mají lesklejší vzhled. Vlivem lineárního růstu teploty dochází k aktivování tavidla, jeho funkčnosti a přítomnosti během celého přehřevu, což u druhého zmíněného typu není. Lineárním nárůstem teploty ubývají problémy způsobené teplotním šokem vlivem vysokého gradientu teploty. Zajímavá je i lepší ekonomičnost provozu [17] [4]



Graf 2 – teplotní profil lineárního typu [17]

1.9 Příčný teplotní profil

Příčný teplotní profil na rozdíl od podélného profilu je ovlivněn zejména konstrukcí přetavovací pece a také hustotou osazení DPS. Příčný teplotní profil znázorňuje nehomogenitu přetavovacího tunelu v příčném směru během pájení přetavením. V současné době dosahují kvalitní přetavovací pece u příčného profilu rozdílu teplot $\pm 2^{\circ}\text{C}$. [22]

2 Termomechanické zkoušky

Mechanické vlastnosti pájených spojů výrazně zasahují do životnosti a funkčnosti jednotlivých výrobků. Nejvíce náchylné jsou na mechanické namáhání, (ohyb, tah, smyk) a na otřesy. S těmito druhy namáhání se moderní přístroje potýkají téměř neustále, proto je důležité podrobovat spoje a další části zařízení testům.

„Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny mikrostrukturou materiálu“. [1] Mikrostruktura je daná: pájkou, pájecími ploškami, součástkami, procesem přetavení a pracovními podmínkami (vibracemi, teplotami). Významný vliv na mechanické vlastnosti spoje má tepelné namáhání, které může zapříčinit vnitřní termomechanické napětí. Vznik termomechanického napětí je zapříčiněno rozdílnou tepelnou roztažností jednotlivých součástí spoje. Zátěž těmito termomechanickými změnami vede k únavě spoje, ke vzniku trhlinek a následnému poškození. [1]

2.1 Termomechanické namáhání pájeného spoje

Pokud je pájený spoj mechanicky namáhán dochází k deformacím. Toto namáhání je způsobeno třemi hlavními vlivy:

- Rozdílná teplotní dilatace součástky a substrátu
 - Teplotní cyklování součástky a substrátu
 - Výkonové zatížení součástek
- Prohnutí montážního celku
- Vibrace montážního celku

Mimo výše uvedené příčiny, má na odolnost vůči mechanickému namáhání vliv typ pájecí slitiny a geometrie spoje – velikost pájených plošek, výška pájeného spoje, výška mezi substrátem a součástkou.

Teplotní dilatace je důsledkem rozdílného koeficientu tepelné roztažnosti u použitých materiálů. K těmto dilatacím dochází vlivem změny teploty při pájecím procesu, při montáži nebo v běžném provozu. Dochází ke změně rozměru jednotlivých částí, což má vliv na změnu tvaru pájeného spoje a pnutí v něm. Následující vztahy popisují mechanické namáhání.

Pro poměrné prodloužení (ε) platí vztah:

$$\varepsilon = (\alpha_c - \alpha_s) \cdot \Delta T \quad (1)$$

Kde: α_c – teplotní součinitel délkové roztažnosti součástky [K^{-1}]

α_s – teplotní součinitel délkové roztažnosti substrátu [K^{-1}]

ΔT – rozdíl teplot kde:

$$\Delta T = T_2 - T_1 \text{ [K]} \quad (2)$$

T_1 – pracovní teplota [K]

T_2 – teplota tuhnutí [K]

Pro mechanické napětí (σ) ve spoji platí vztah:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \text{ [Pa]} \quad (3)$$

Kde: E – Youngův modul pružnosti v tahu [Pa]

Po dosazení vypadá vztah:

$$\sigma = E \cdot (\alpha_c - \alpha_s) \cdot \Delta T \quad (4)$$

Dále je také důležitým vztah Coffin Mansonův, který uvádí cyklické namáhání spoje způsobené díky rozdílným teplotním roztažnostem materiálů. Při cyklickém teplotním namáháním dochází k deformaci fáze, snížení pevnosti a křehnutí spoje.

$$N_f = \frac{C}{\delta^2} \quad (5)$$

N_f – počet cyklů do poruchy [-]

Δ – plastická deformace během jednoho cyklu [-]

C – materiálová konstanta [-]

2.2 Typy zkoušek pájených spojů

Typů zkoušek pro spolehlivostní analýzu pájeného spoje je řada, nejvíce zastoupeny jsou zkoušky vibracemi a tepelné. V této rešerši je cílem přiblížit zkoušky týkající se termomechanického působení, proto budou vybrány a popsány ty nejdůležitější.

2.2.1 Zrychlené testování

Zrychlené testy, konstantním namáháním se pozoruje časově závislé šíření poruch na zkoumaném vzorku. U krokového namáhání, je namáhání na vzorek postupně zvyšováno. U tohoto namáhání je důležité sledovat poslední krok, při kterém dojde k poruše. [6]

Pro zrychlené testování se nejčastěji používá konstantní namáhání silou, nebo mezní teplotou.

2.2.2 Tepelné zkoušky

Tepelné zkoušky za ustáleného stavu se mohou rozdělit na dvě skupiny, jednou skupinou jsou nízkoteplotní zkoušky. Zde se pomocí cyklického namáhání nízkou teplotou zjišťuje křehkost materiálu. Druhou skupinou jsou vysokoteplotní zkoušky. Zde se sledují mechanismy probíhající za zvýšených teplot, jako jsou: difúze, teplotní migrace, tečení materiálu atd. [6]

2.2.3 Tepelné cyklování

Tepelné cyklování je proces cyklických změn teploty na zkoumaný vzorek. Rychlost změny musí být dostatečně pomalá, aby se vyloučilo působení tepelného šoku. Udává se hodnota 20°C/min. Změna teploty v komoře způsobuje pnutí, které sebou přináší poruchy struktury. [6]

2.2.4 Teplotní šok

Je zkouška, při které se dosahuje rychlé změny okrajových teplot, při kterých dochází k deformacím a pnutím. Rychlost změny teploty u teplotního šoku je na rozdíl od cyklování větší než zmiňovaná hodnota 20°C/min. K deformacím dochází díky rychlým změnám teplotního gradientu. [6]

2.2.5 Vibrace

Dalšími zkouškami jsou vibrace. Vibrace mohou být periodické nebo náhodné. Jsou definovány jako „periodické nebo náhodné impulsy při střídání opačných směrů z hlediska rovnováhy. Dané zatěžování je typické pod mezí trvalé deformace materiálů.“ [6]

2.2.6 Mechanický šok

Šok, který je definován jako rychlý přenos mechanické energie do systému. Má za následky změny v pnutí, rychlosti nebo zrychlení. [6]

3 Intermetalické vrstvy

Při pájecím procesu dochází k pohybu hmoty materiálů a k vytváření chemických vazeb reakcemi na styku povrchových úprav součástka – pájky – pájecí plošky na DPS, pomocí přivedené (většinou tepelné) energie. Ke spojení dochází vlivem metalurgické reakce, tzn. aktivní prvek pájky (většinou cín) reaguje s materiálem pájecí plošky a tím se vytváří tenká spojovací vrstva. Z agresivity roztavené pájky je patrný požadavek na zkrácení doby pájení, aby nedošlo k vytvoření příliš silné vrstvy intermetalických sloučenin, které mají většinou negativní účinky na pájené kovy. Jejich vznik je při přetavení, ale i při normálních teplotách difúzí. Tento průnik atomů kovu do druhého kovu má vliv na mechanické vlastnosti pájeného spoje. [2]

Za intermetalickou sloučeninu, neboli intermetalikum lze považovat sloučeninu minimálně dvou odlišných kovů. Intermetalické sloučeniny se vytvářejí na rozhraní dvou spojovaných materiálů. Intermetalika můžeme specifikovat díky svým fyzikálním a mechanickým vlastnostem, kde jejich aplikační potenciál není dosud znám. Proto jsou zajímavé pro materiálový výzkum.

V elektrotechnice jsou IMC vrstvy zkoumané zejména ve strukturách pájených spojů. Hlavními cíli výzkumů je pozorování tvorby, struktury a růstu IMC a jejich vliv na vlastnosti pájených spojů. Velký vliv na vlastnosti pájeného spoje má velikost a šíření IMC, protože tvoří jeho nedílnou část struktury.

3.1 Proces vzniku IMC

Během procesu smáčení a roztékání pájky po povrchu, je mezikovové rozhraní nahrazováno více či méně spojitou přechodovou tzv. intermetalickou zónou (IMC). Ke vzniku intermetalické oblasti dochází procesy rozpouštění i difúze. [2] Jako nejvíce kritický okamžik tvorby IMC je čas, kdy se začíná pájka tavit. Během procesů se vytvářejí na rozhraní mezi smáčeným povrchem a roztavenou pájkou chemické a fyzikální vazby. Při tuhnutí roztoku, slitiny kovů, které mají omezenou rozpustnost, mohou vzájemně vytvořit v poměru nové fáze. V této době, nastává fáze smáčení, narůstá vrstva IMC do nepravidelné morfologie³. Do reakce vstupuje atom kovu a atom pájky. Tuto krystalickou strukturu nazýváme intermetalická sloučenina. Příčinou jejího vzniku jsou např.: nesprávné teploty pájení, příliš dlouhá doba pájení, opakované pájení, znečištěný povrch plošek, špatné složení pájení. [1][2]

³ Nauka zabývající se strukturou, formou a tvarech

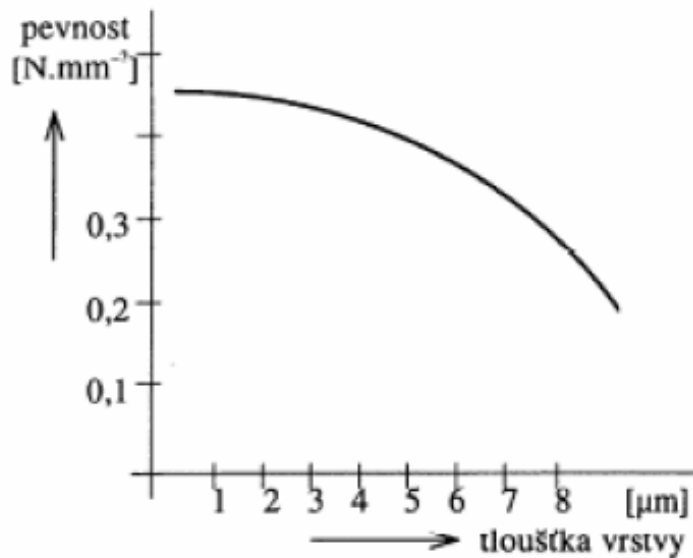
Mechanismem rozpouštění se zastaví vytvářením intermetalické vrstvy a pokračuje dále jen pomocí difúze v pevné fázi. *Právě úzké kanálky mezi nepravidelnou morfologií a tloušťky vrstvy IMC vytvářejí prostor pro další difúzi kovů z povrchu plošky DPS.*[1] Difúze probíhá zprvu rychle a postupně se zpomaluje při dosažení saturace rozpuštěných atomů pájky. Důležitým faktorem, který výrazně ovlivňuje difúzní proces je teplota. Lze předpokládat možný vývin IMC, původně vytvořených při reaktivním smáčením, to může výrazně ovlivňovat mikrostrukturu a mechanické vlastnosti spojů. [1]

3.2 Vlastnosti IMC

Růst intermetalické vrstvy na rozhraní pájeného materiálu a pájky přímo ovlivňuje spolehlivost pájeného spoje. Přítomnost IMC je z jedné strany nezbytná, jelikož vznik je při smáčecím procesu čímž zajišťuje vyšší pevnost spoje. Na druhé straně jsou jejich vlastnosti odlišné, nežádoucí od pájených materiálů či pájky. Zpravidla nežádoucí je jejich příliš velká rychlost narůstání. Vznikají z odlišných příčin a to:

- příliš vysoká teplota přetavení
- pomalé ochlazování
- příliš dlouhý čas pájení
- znečištěné povrchy
- a další

Mezi nežádoucí vlastnosti patří zvýšená rezistivita, křehkost a menší tepelná vodivost. Při zvýšené přítomnosti těchto vrstev, dochází ke snižování životnosti pájených spojů. Pokud se sleduje spolehlivost pájených spojů, je třeba zjistit vlivy materiálových a procesních parametrů na strukturu a tloušťku IMC vrstvy. Nekvalitně vytvořené vazby na rozhraní mezi pájkou a povrchem, teplotní cyklování a mechanické namáhání spoje vede ke snížení spolehlivosti spoje. Stárnutím s dalšími difúzními procesy ve sloučeninách vede k další degradaci, snížení kvality a snížení mechanické pevnosti kontaktu. [8]



Graf 3 – závislost pevnosti spojů na tloušťce difúzní vrstvy [2]

Na grafu č. 3 je vidět závislost pevnosti pájeného spoje na tloušťce intermetalické sloučeniny. S rostoucí tloušťkou IMC klesá mechanická pevnost spoje a s tou klesá i spolehlivost. Proto je důležité zabývat se možným vznikem a růstem IMC a optimalizovat podle tohoto parametru průběh přetavení spojů.

Tloušťka IMC a morfologie u pájeného spoje se s časem mění. Vrstva není po dobu života stejná, ale roste s časem. Růst vrstvy IMC je závislý na teplotě přetavení (ovlivňuje ho Q_η tzv „Heating factor“ – uvedený v následující kapitole), ale roste i při běžné provozní, pracovní teplotě. Všeobecně platí, že tloušťka IMC nesmí být větší jak polovina celkové tloušťky pájky. Pokud je tloušťka větší jak polovina, dochází k poklesu pájitelnosti.[1]

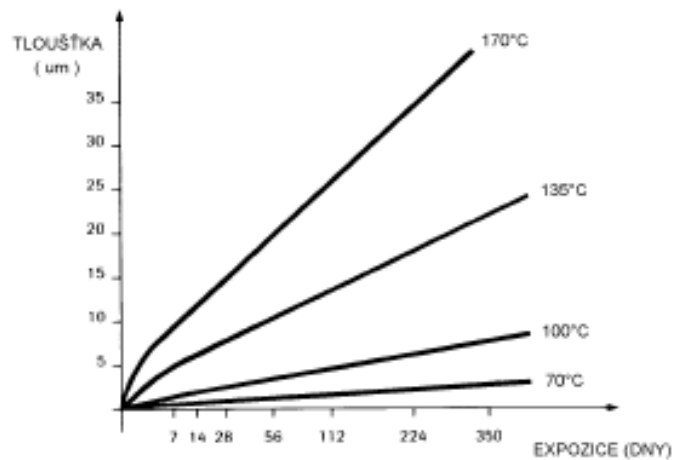
Vztah pro rychlost růstu IMC:

$$\delta = 10^3 \cdot e^{\frac{-5000}{T}} \cdot \sqrt{t} \quad (6)$$

Kde: δ – tloušťka intermetalické vrstvy [μm]

T – teplota [K]

t – čas [s]



Graf 4 - závislost tloušťky růstu intermetalické vrstvy na čase pro různé teploty [2]

Na grafu č. 4 je zobrazena závislost růstu IMC na čase s různými teplotami. Na tomto grafu je patrný lineární růst tloušťky IMC závislý na době stárnutí. Je zde také vidět velký rozdíl růstu při odlišných teplotách. Se zvyšující se teplotou razantně roste tloušťka IMC. Z grafu vyplývá, že je nutné vyvarovat se vystavení pájeného spoje vyšším teplotám, než jsou potřeba k přetavení. Toto má praktické důsledky, kdy IMC bude jinak růst díky jiným přetavovacím teplotám například u pájecí slitiny Sn42Bi58 (teplota tání 138°C) oproti pájecí slitině Sn99,3Cu0,7 (teplota tání 227°C), kdy tento typ potřebuje vyšší teplotu na přetavení. Z grafu 4 je jasně patrný vliv rozdílnosti růstu IMC při pracovních a skladovacích podmínkách výrobku. [2]

3.3 Intermetalické vrstvy různé typy

Během pájení dochází k rozpouštění kovů na povrchu pájeného substrátu a pájky. Dochází tedy k rozpouštění základních kovů u DPS většinou u bezolovnatého pájení je to měď, nikl a zlato. Tím to rozpouštěním materiálů dochází k reakci a ke vzniku IMC. Nejvíce IMC sloučeniny jsou zastoupeny v podobě binárních systémů Cu-Sn, Au-Ni, Ni-Sn. Prvky obsažené v pájkách jako je bismut nebo olovo nereaguje s kovy, jako jsou zlato, měď a nikl. Proto vznikají pájky Sn-Ag, Sn-Pb, Sn-Bi, kdy cín obsažený v těchto pájkách reaguje s kovy na povrchu většinou měděném. [2] [8]

V následující tabulce č. 1 jsou vypsány příklady pájecích slitin a k nim vypsané možné vytvořené intermetalické sloučeniny.

Tabulka 1 - Příklad pájecích slitin a jejich Intermetalické sloučeniny

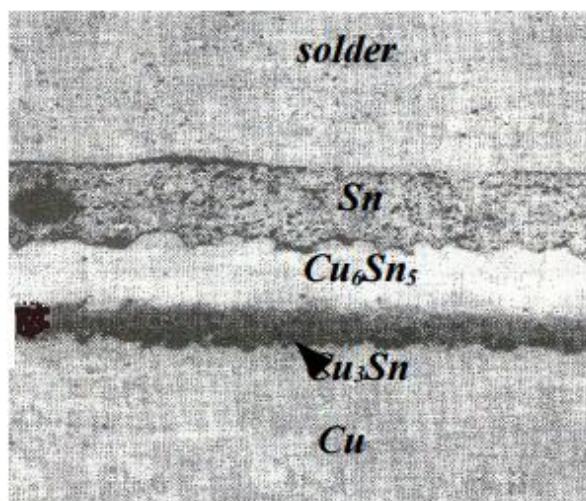
Pájecí slitina	Intermetalické sloučeniny
Sn _{3,5} Ag	Ag ₃ Sn, Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
Sn _{3,4} Ag _{0,8} Cu	Ag ₃ Sn, Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
Sn ₃ Ag ₃ Bi	Ag ₃ Sn, Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
Sn ₉ Zn	CuZn, Cu ₅ Zn ₈ , Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
Sn ₈ Zn ₃ Bi	CuZn, Cu ₅ Zn ₈ , Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
Sn _{0,7} Cu	Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
Bi ₄₃ Sn	Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn, Cu – Sn - Bi
Bi ₄₂ Sn _{0,5} Ag	Ag ₃ Sn, Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn, Cu – Sn - Bi
In ₄₈ Sn	Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn, Cu – Sn - In

3.3.1 Intermetalické sloučeniny Sn – Cu

U této kombinace dochází k tvorbě dvou typů intermetalických sloučenin: a to Cu₆Sn₅ a Cu₃Sn. Okamžitě na rozhraní vzniká IMC složení Cu₆Sn₅. Po určité době stárnutí vzniká fáze Cu₃Sn, která vzniká difúzí mezi Cu a Cu₆Sn₅. Tedy v blízkosti měděného povrchu je Cu₃Sn – označovaná také jako ε- fáze, a dál od pájecí plošky se vytváří Cu₆Sn₅ – η fáze. Intermetalické fáze mají odlišnou teplotu tavení než teplota pájení. Teplota tavení u sloučeniny Cu₆Sn₅ je 415°C a u sloučeniny Cu₃Sn – 670°C. Spojení těchto fází je zásadní problém, při ní dochází k pohlcování atomů mědi. V tomto spojení vzniká Krikendallový efekt⁴, neboli dochází k vytváření prázdných míst (vytváření voidů).[1]

Tyto vrstvy jsou znázorněny na následující stránce a obrázku č. 6, fáze Cu₆Sn₅ je ve většině případů silnější:

⁴ Pohyb hranice vrstvy mezi dvěma kovy, způsobena odlišnou rychlostí difúze atomů



Obr. 6 - fázové rozhraní intermetalické struktury na rozhraní měď – pájka [23]

3.3.2 Intermetalické sloučeniny u pájek obsahujících stříbro

Jednou z řady pájecích slitin obsahujících stříbro je pájecí slitina SAC. U této slitiny se vytváří intermetalické sloučeniny už zmíněné – Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn , ale i další Ag_3Sn . Poslední zmiňovaná sloučenina se vyskytuje v podobě destiček. To může mít špatný vliv na mechanickou celistvost spoje. Může docházet k vzniku mikrotrhlin při teplotním, či mechanickém namáhání. Destičky sloučeniny Ag_3Sn se mohou vytvořit kdekoli v celém prostoru pájeného spoje a to je nežádoucí. [5], [9]

3.3.3 Intermetalické vrstvy u ENIG

U povrchové úpravy ENIG je vrstva niklu, na které je vrstva zlata, která se rozpouští. Okamžitě po rozpuštění vrstvičky zlata v SAC vstupuje do reakce niklová vrstva s cínem. Nikl s cínem vytváří IMC vrstvu Ni_3Sn_4 a také na mezifázovém rozhraní ternární vrstvu $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$, která je velmi tenká během procesu pájení a až během teplotního stárnutí pomalu roste na tloušťku 4 – 5 μm . [2]

4 Heating factor

Při posuzování spolehlivosti pájených spojů má velký vliv na životnost pájeného spoje termomechanické namáhání. Prokázalo se, že poruchy spojů jsou vyvolané tepelnou únavou, která je zapříčiněna rozdílným koeficientem roztažnosti (v textu zmíněno výše). Příčin vzniku toho to poškození je více, ale nejčastěji je to zapříčiněno intermetalickou vrstvou. Intermetalická vrstva s nárůstem tloušťky má negativní vliv na pájené spoje a na celkovou spolehlivost. V minulosti se tento problém řešil zkoumáním tloušťky IMC mezivrstvy Cu-Sn a mikrostrukturální analýzou. Při tomto měření bylo za potřebí složité vybavy, jako je elektronový mikroskop, či disperzní analýza s výbrusy. [2]

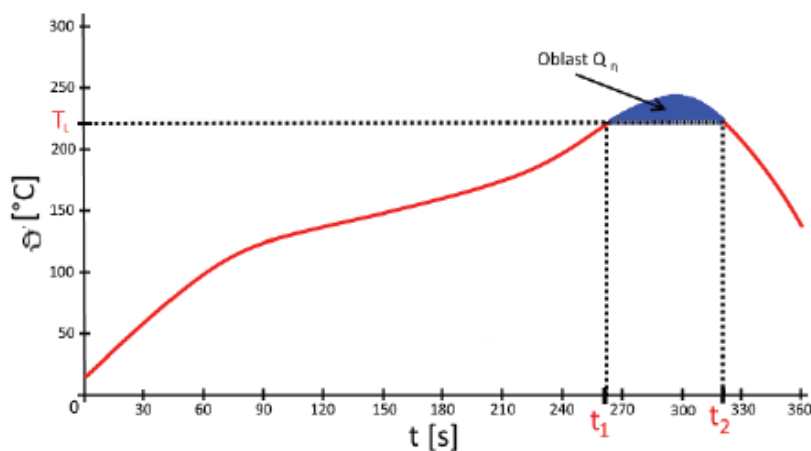
Vlivem náročnosti měření, vytvoření výbrusu bylo patrné, že tato cesta je velice nákladná a časově nevhodná pro kontinuální měření a kontrolu kvality během výroby a přetavení sériových kusů. Z těchto důvodů se vyvinul nový způsob. Tím je tzv. „Heating factor“, který je kombinací účinků teploty přetavení a času nad teplotou likvidu během procesu pájení.

4.1 Definice heating factoru

Heating factor, neboli integrál teploty a času, lze přiblížit jako integrál měřené teploty $T(t)$ nad teplotou tavení T_L a dobou, kterou pájka setrvá v kapalném stavu. Rozdíl $(t_1 - t_2)$ je doba nad bodem tání. Integrál teploty a času se označuje Q_η , matematická definice vypadá následovně: [4]

$$Q_\eta = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_L) dt \quad (7)$$

Jednotkou integrálu teploty a času Q_η je Kelvin sekunda ($s \cdot K$), nebo stupeň Celsia sekunda ($s \cdot ^\circ C$).



Graf 5 - příklad přetavovacího profilu s vyznačenou oblastí „heating factoru“ [5]

4.2 Vliv heating factoru na intermetalickou vrstvu

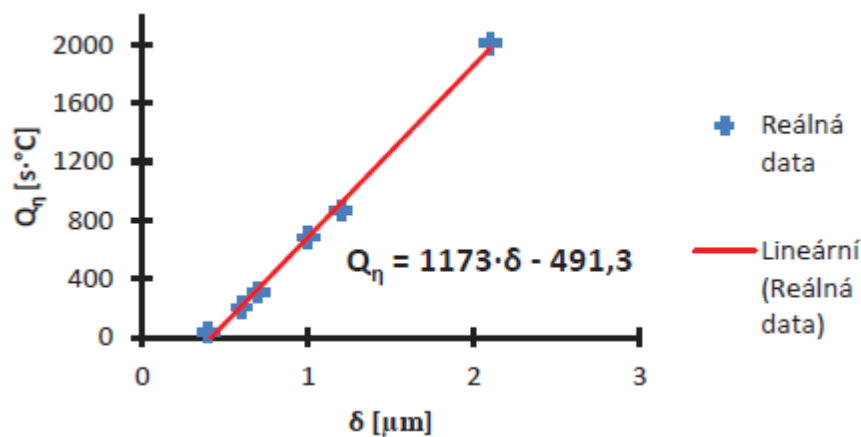
Významný vliv na tvorbu intermetalické vrstvy má heating factor. Experimentálně se zjistilo, že závislost tloušťky intermetalické vrstvy na heating factor je téměř lineární. S přírůstkem Q_η roste intermetalická vrstva až do dosažení saturační hodnoty. Tato hodnota se např. u pájky Sn63Pb37 pohybuje kolem $3\mu\text{m}$ na měděné pájecí ploše. Pomocí výsledků a experimentálním měřením se došlo k přibližné matematické rovnici, která popisuje tuto závislost, tedy závislost tloušťky intermetalické vrstvy na velikosti Q_η pro Sn63Pb37 [4]:

$$Q_\eta = 1174 \cdot \delta - 491,3 \quad (8)$$

Kde:

δ – střední hodnota tloušťky IMC [μm]

Závislost je znázorněna na následujícím obrázku:



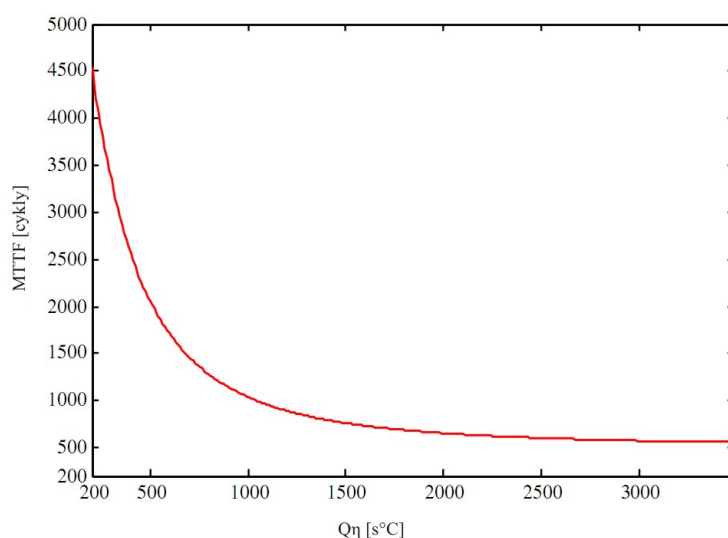
Graf 6 - Závislost tloušťky IMC na velikosti Q_η [5]

Z grafu č. 6 vyplývá poměrně jednoduchá říditelnost růstu IMC pomocí vhodně zvoleného Q_η .

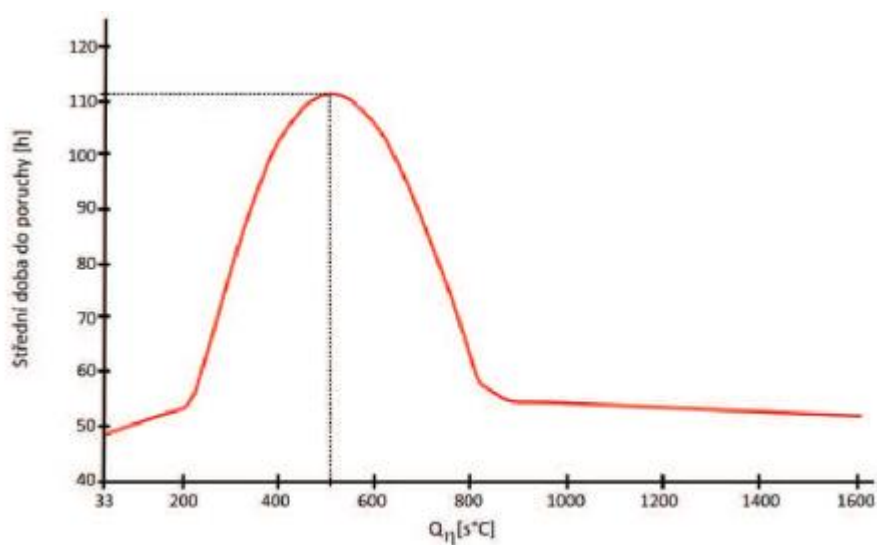
4.3 Vliv heating factoru na spolehlivost pájeného spoje

Na spolehlivost pájeného spoje má velký vliv přírůstek intermetalické fáze. Na začátku této kapitoly bylo zmíněno, že z důvodu náročného měření tloušťky intermetalické fáze pomocí destruktivních mikro výbrusů a elektronové mikroskopie se přešlo k snadnější nedestruktivní metodě měření pomocí integrálu času teploty nad teplotou přetavením. V následujících odstavcích bude ukázáno rozdílnost výsledků při různých způsobech testování.

Z experimentů pro pájku Sn63Pb37 (při metodě teplotního cyklování) bylo dokázáno, že střední doba do poruchy je závislá na heating factoru. Ze zobrazeného grafu č. 7 (z literatury [5]) lze vyčíst, že s přibývajícím hodnotou Q_{η} střední doba do poruchy prudce klesá a blíží se konstantní hodnotě střední doby do poruchy. Hodnota $Q_{\eta} > 1500 \text{ s}^{\circ}\text{C}$ - je pokles střední hodnoty malý a pro vyšší hodnoty je téměř zanedbatelný, vůči změně hodnoty mezi $200 \text{ s}^{\circ}\text{C}$ - $1000 \text{ s}^{\circ}\text{C}$, kde je rozdíl významný. Z tohoto grafu a těchto závěrů lze usoudit, že pro nejlepší hodnotu střední doby do poruchy by se hodnota Q_{η} měla řídit během přetavení na nízké úrovni. [5] [4]



Graf 7 - střední doba do poruchy na Q_{η} [5]



Graf 8 - Střední doba poruchy na Q_{η} [8]

Naproti tomu na grafu 8 je uveden výsledek mechanického vibračního testu spolehlivost u BGA (ball grid array) pouzder při různých hodnotách $Q\eta$. Z toho to grafu, vyplývá, jak střední hodnota do poruchy výrazně roste od $Q\eta = 200 \text{ s}\cdot^\circ\text{C}$ do hodnoty $500 \text{ s}\cdot^\circ\text{C}$ a pak následně prudce klesá zhruba do $800 \text{ s}\cdot^\circ\text{C}$. Pro vibrační namáhání je patrné, že jako optimální hodnota řízení $Q\eta$ pro přetavení je mezi $300 - 700 \text{ s}\cdot^\circ\text{C}$. S hodnotami $Q\eta$ pod, nebo nad těmito hranicemi by docházelo k výraznému snížení spolehlivosti. [4]

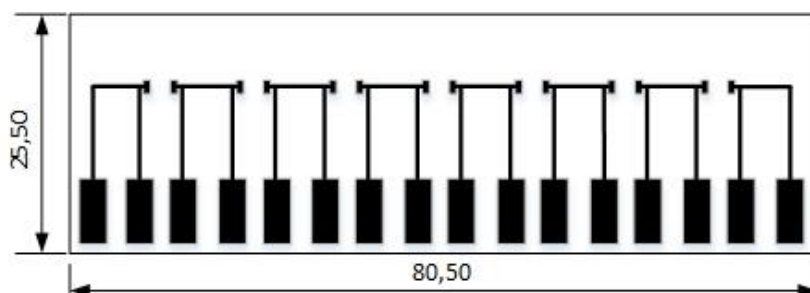
5 Praktická část

5.1 Úvod do praktické části

Na základě teoretické části popsané v předchozích kapitolách byl vymyšlen a zhotoven praktický experiment. Cílem této praktické části, bylo navrhnout desky plošných spojů s různými povrchovými úpravami, nanést pomocí šablony pájecí pastu, následně DPS osázet součástkami a přetavit v horkovzdušné peci s různými teplotami přetavení (různými teplotními profily) kvůli vlivu tzv. „heating factor“, zkoumat jejich termomechanickou odolnost a zhodnotit jejich strukturu z pohledku intermetalických vrstev.

5.2 Návrh desky plošných spojů

Na začátku této praktické části diplomové práce jsem navrhl desku plošného spoje. Návrh motivu DPS byl vytvořen v softwaru Microsoft Visio jako výkres, kde se za pomoci dalších programů exportoval do formátu GBR., který byl vyžadován firmou pro zpracování nabídky a výroby DPS. Za motiv, který je vidět na obr. č 7 byl vybrán pro tuto problematiku jednoduchý motiv vodivých cest a pájecích plošek DPS.



Obr. 7 – návrh testovací DPS (rozměry v mm)

Návrh tvarový a rozměrový byl zpracován podle starých DPS, které se nacházely na katedře. Pro účely této diplomové práce byly DPS objednány ve třech povrchových variantách a to:

- HAL
- ENIG
- Cu

Deska plošného spoje byla vyrobena z klasického materiálu FR4 (popsaného výše). Pro účely fakulty bylo vyrobeno řádově stovky DPS, které budou sloužit k praktickým a vědeckým účelům. Pro účely této diplomové práce bylo potřeba osázet od každé z povrchové úpravy dvanáct DPS, to znamená celkově osázet a přetavit 36 DPS. Na jednu DPS se vejde sedm SMD odporů.

5.3 Výroba vzorků

Testované DPS s povrchovými úpravami byly vytvořené tak, aby byly pro návrh a výrobu jednoduché a zároveň splňovaly účelnost pro praktické testy. Důležité bylo, aby velikost pájecích plošek seděla s otvory na již vytvořené šabloně pro nanášení pájecí pasty a také plošky seděly s osazovanými součástkami.

5.3.1 Pájecí slitina a osazení

Po vytvoření DPS se přešlo k praktické části vytvoření testovacích vzorků tedy sestavy DPS s osazenými SMD součástkami. Pro osazení pájecích plošek se vybrala standardní součástka R1206 SMD rezistory $1M\Omega$. Součástky tohoto typu jsem zvolil vzhledem k velikosti pájecích plošek DPS. Součástky byly vybrány také proto, aby jejich velikost byla dostatečná pro uchycení trhací sestavy namáhání smykem. Nesmělo docházet ke sklouzávání čelistí nebo ke špatnému namáhání soustavy proti DPS namísto proti zkoumané součástce a pájenému spoji.

Na připravenou desku byly pomocí šablonového tisku nanесeny dvě pájecí pasty, které byly přetaveny různými teplotními profily. První z nich je SnBi(Sn42Bi58). Tato slitina je vybrána pro svůj nízký bod tavení, její bod přetavení je výrobcem udán na 138°C . Jak bylo výše zmíněno, obsah bismutu snižuje bod přetavení a křehkost. Jako druhá pájecí pasta byla vybrána SnCu(Sn99,3Cu0,7). Druhá ze zmíněných pájecích past má bod tání na 227°C a vyznačuje se svojí odolností proti únavovým vlivům a mechanickou odolností.

Před usazením desky pro nanесení pájecí pasty šablonovým tiskem byla celá soustava a jednotlivé desky očištěny od prachu a mastnoty chemickým prostředkem (izopropylalkohol). Každá DPS se musela pro přesnost nanесení pájecí pasty zafixovat proti pohybům, aby nedošlo k nanесení pasty mimo pájecí plošky. Po usazení desky plošných spojů se pomocí šablony nanесla pasta pro všechny kombinace povrchových úprav. Při výměně pájecí pasty bylo důležité vždy očistit šablonu chemickým prostředkem, aby nedocházelo ke kontaminaci pájecí pasty z předešlé nanášené slitiny a nebyly zde další nechtěné nečistoty.

5.3.2 Přetavení v horkovzdušné peci

Pro zapájení součástek SMD byla vybrána metoda přetavení v horkovzdušné peci Mistral 260. Jedná se o horkovzdušnou pec s dopravníkovým pásem, na kterém probíhají desky čtyřmi jednotlivými zónami. Jednotlivé zóny jsou na sobě nezávislé. Umožňují tak dostatečný přehřev sestavy, přetavení a následné plynulé ochlazení pomocí dvou ventilátorů na konci přetavovací pece.



Obr. 8 – horkovzdušná pec Mistral 260

Tato přetavovací pec umožňuje velmi přesný a kvalitní proces přetavení s nastavením teploty s přesností až na 0,1°C a maximální teplotou až 300°C. Nastavení a indikace teploty pro jednotlivé zóny přetavovací pece jsou řízeny procesorem a vyobrazeny na dotykovém LED – displeji, kde je umožněno nastavení rychlosti dopravníkového pásu a teploty zón.

V následující tabulce č. 2 jsou vypsány základní parametry pece Mistral 260.

Tabulka 2- Specifikace přetavovací pece Mistral 260 [23]

Parametr	hodnota
Napájení	230 V
Příkon	3,6 kW
Šířka dopravníku	260 mm
Rychlost posuvu	10 – 120 cm/min
Vstupní výška	20 mm
Regulace po	1 °C
Rozměry	154x60x36 cm
hmotnost	60 kg

5.4 Teplotní profily přetavení

Teplotní profil, konkrétní nastavený průběh teploty v horkovzdušné peci na čase je důležitým parametrem pro celý proces vytvoření kvalitního pájeného spoje. Jeho dobré nastavení znamená kvalitní spoj s kvalitními vlastnostmi. Dále je velice důležitý pro součástky, aby nedocházelo k poškození součástek teplem nebo k tepelnému šoku, který je pro součástky i pro DPS nežádoucí a může zapříčinit např. deformaci desek a s ní spojenou problematiku.

Neméně je teplotní profil důležitý v problematice popsané v teorii v kapitole 5 tzn. „*Heating factor*“ a s ním spojený růst intermetalických vrstev. Teplotní profil je udáván výrobcem pájecí pasty. Důležitým údajem u teplotního profilu je doba trvání jednotlivých přehřevů, přetavení a tvar profilu. Vlivem časově delšího přetavení nebo vyšší hodnoty přetavovací teploty může docházet k zvýšenému růstu intermetalických vrstev. Tento problém může zasahovat do vodivosti a mechanické pevnosti spojů.

V teorii byly zmíněné dva možné podélné tepelné průběhy a to sedlovitý (RSS) a lineární (RTS). Z uvedených průběhů má pec Mistral 260 první zmiňovaný typ sedlovitý (RSS) Typ průběhu je dán technickými parametry pece a její technologií.

5.4.1 Kic profilometr .

Pro zaznamenání, nastavení a konfiguraci teplotního profilu jsem použil profilometr KIC Explorer 2000. Toto zařízení zahrnuje softwarovou část na počítač pro zaznamenání naměřených hodnot a hardwarovou část měřícího přístroje s termočlánky.



Obr. 9 - profilometr KIC explorer

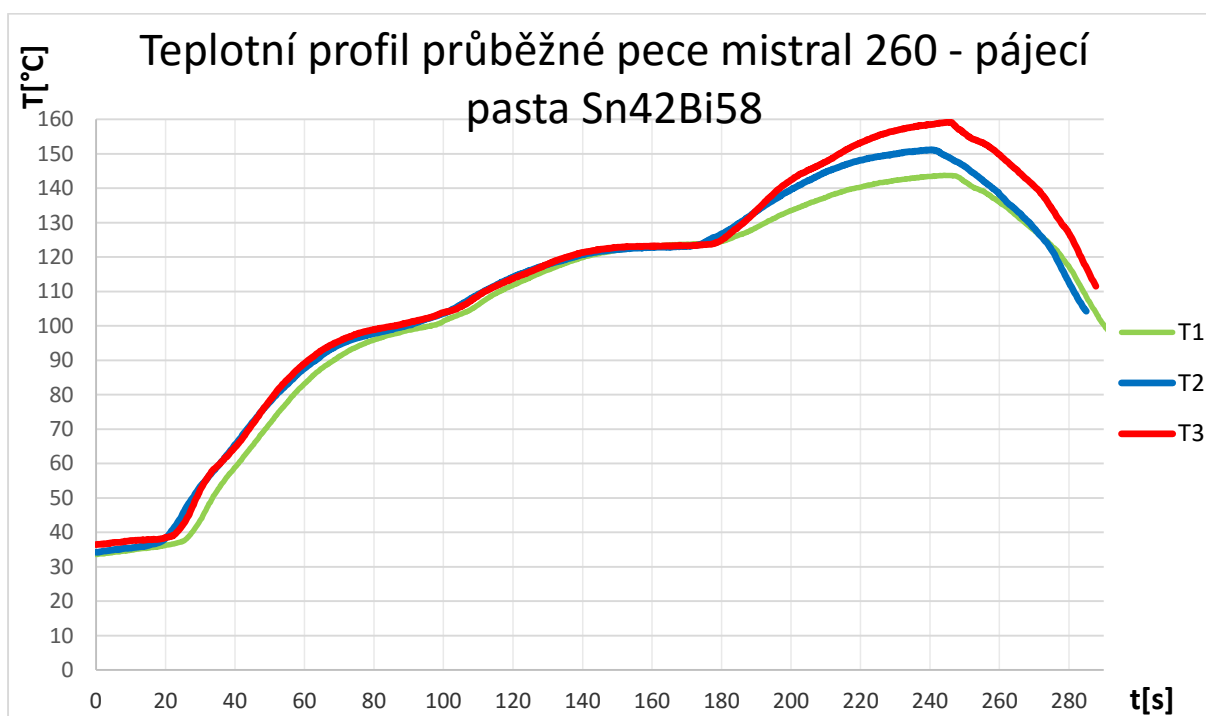


Obr. 10 – softwarové prostředí SLIMKIC 2000

Zařízení je tvořeno snímačem pro 7 kanálů, ke kterému se připojují termočlánky. Zaznamenává teplotu okolí, kde termočlánky se používají k připájení k DPS a k následnému proměření teplot přímo na plošném spoji.

5.4.2 Teplotní profil pro pájecí pastu Sn42Bi58

Parametry přetavovacího teplotního profilu na peci Mistral 260 byly nastaveny tak, aby odpovídaly doporučeným parametrům výrobce pájecí pasty. První pájecí pasta byla vybrána cín - bismutová, která má dle specifikací teplotu přetavení 138°C. Jako první byl nastaven předehřev a to u všech testovacích vzorků a u všech teplotních profilů na 110°C, který trval 80s. Druhá zóna v peci na předehřev byla nastavená na 130°C a sestava v této zóně byla předehřívána 80s. Protože teplota nastavená v peci není stejná jako teplota přímo na spoji tak pro jistotu dosažení teploty přetavení jsem nastavil hodnotu o více jak 5°C více než doporučuje výrobce na 145°C, aby bylo zajištěno dostatečné množství tepla potřebného ke kvalitnímu přetavení. Doba přetavení trvala 70s. Pro druhý teplotní profil se nastavily parametry stejným způsobem, jen teplota přetavení byla zvýšena o 10°C na 155°C. U třetího teplotního profilu se nastavila teplota na 165°C. Toto se provedlo z důvodu zkoumání růstu intermetalických vrstev v závislosti na „Heating factoru“.



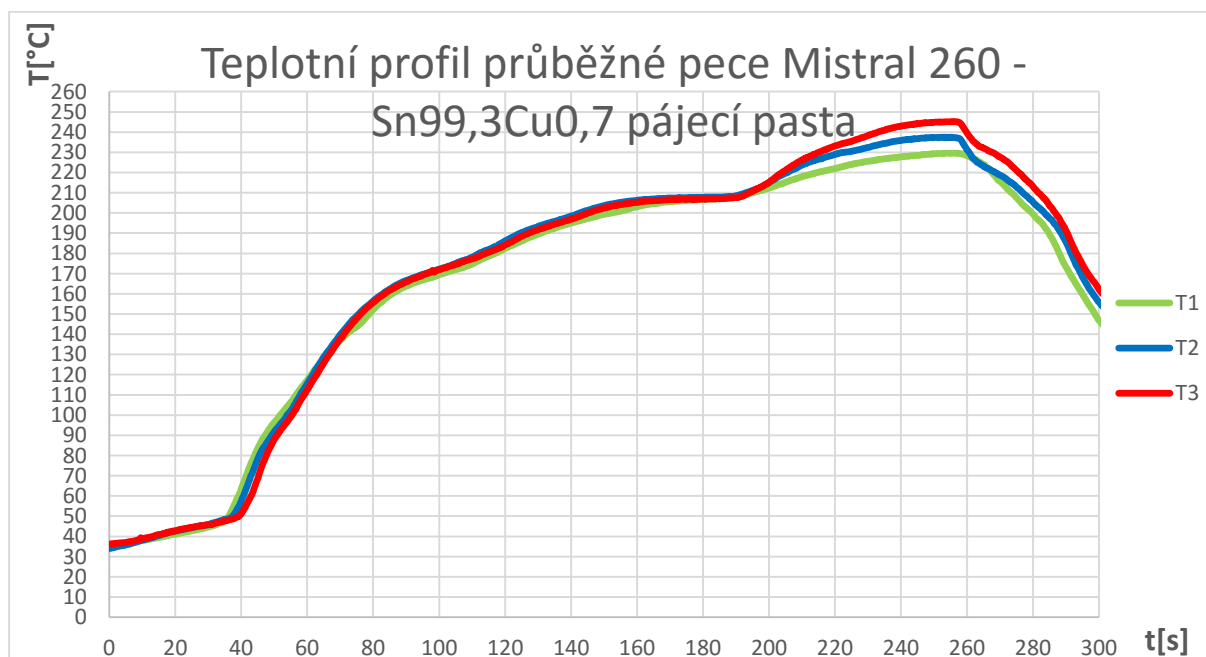
Graf 9 - teplotní profil pece mistral pro pájecí slitinu Sn42Bi58

Na grafu č.9 jsou vyobrazeny teplotní profily nastavené pro bismutovou pájecí slitinu.

Je zde zřetelně vidět sedlovitý typ průběhu s jednotlivými zónami. Na počátku do 20 vteřin se DPS se vzorky pohybovala po dopravníku ještě mimo tepelné zóny pece. Po dopravení DPS do předehřevu je zřetelný nárůst teploty. V první zóně předehřevu se docílila teplota v pájeném spoji 105°C dále sestava procházela do další zóny, kde se růst teploty zpomalil a dosáhl hodnoty 125°C. Až do třetí zóny pece lze vidět prakticky stejný průběh teploty pro jednotlivé nastavené teploty. V třetí přetavovací zóně lze vidět rozdílnost nárůstu teploty. Reálná maximální teplota na spoji pro nastavené teploty byla pro T1 cca 142°C pro T2 150°C a pro T3 160°C. Je zde vidět, že reálná teplota oproti nastavené na peci se lišila cca o 5°C

5.4.3 Teplotní profil pro pájecí pastu Sn99,3Cu0,7

Jako druhá pájecí pasta, která zastupuje bezolovnatou pájecí slitinu s vyšším bodem přetavení, než u bizmutové slitiny je cín- měďná. Výrobce této pasty uvádí teplotu přetavení 227°C. Předehřev byl nastaven na 195°C, který trval 80s. Druhá zóna předehřevu byla nastavena na 215°C po dobu 80s. Zóna přetavení trvala 70s a v prvním případě byla nastavena na 230°C, v druhém 240°C a v třetím na 250°C.



Graf 10 - teplotní profil pece mistral pro pájecí slitinu Sn99,3Cu0,7

Na grafu č. 10 jsou zobrazeny průběhy teplot přetavovacího procesu pro Sn-Cu pájecí slitinu. Průběh je samozřejmě také sedlovitého typu jako u předešlé pasty. Názorně lze vidět rozdílnost oproti tepelným průběhům z cín-bismutové slitiny. Je zde zřetelný rychlejší a vyšší nárůst teploty. Jak bylo řečeno v teorii, tepelné průběhy jsou velice důležité a na tomto rozdílu teplotního průběhu si můžeme všimnout, jak může být zásadní rozdíl ve výběru pájecích slitin pro proces pájení. Některé typy součástek by tuto vyšší teplotu přetavení nesnesly a došlo by k jejich poškození. V praxi je důležité dobré rozhodnutí a zvolení vhodných součástek, typu DPS a pájecích slitin pro konkrétní aplikaci.

Je vidět rozdílnost průběhu teploty ve třetí přetavovací zóně. Teploty naměřené se dostaly těsně pod úroveň teplot nastavených. Z hlediska zkoumání intermetalických vrstev bude zajímavé, jakým způsobem reagovala pájka s povrchovou úpravou.

5.5 Metoda testování termomechanických zkoušek

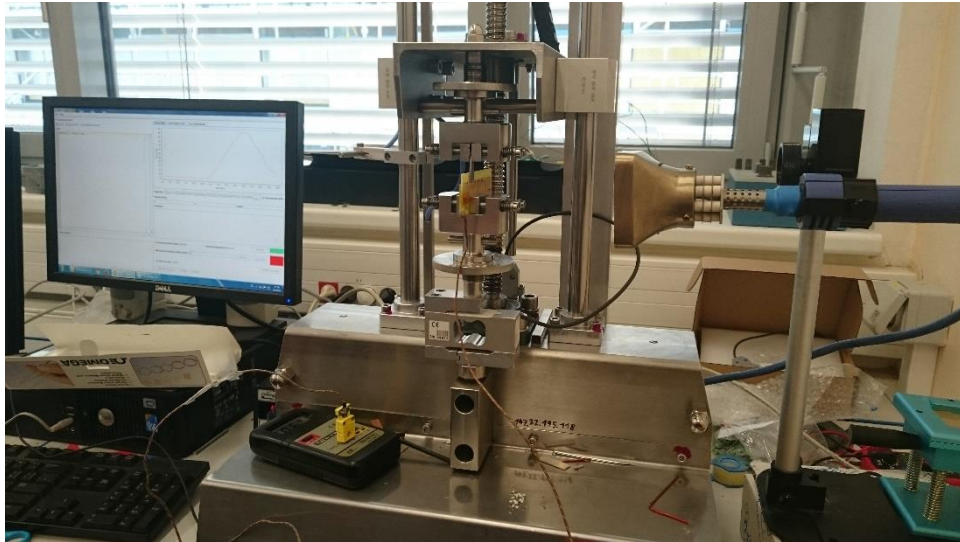
Tato podkapitola je zaměřena na popis měřícího zařízení, na postup měření termomechanických zkoušek a na vyhodnocení výsledků.

Pro termomechanické zkoušky se vybrala metoda mechanického namáhání spoje ve smyku. Součástky plošných spojů a spoje jsou v praxi namáhány různými způsoby namáhání. Jednou z nejdůležitějších zkoušek je namáhání vibracemi, tepelné namáhání a další. Výrobky se neustále zmenšují a tím může docházet k dotyku jednotlivých součástí, případně může být zařízení pod vlivem různých druhů sil, které mohou docílit stavu, kdy je zařízení deformováno a může docházet k dotyku jednotlivých částí, konstrukcí i funkčních součástek jako jsou SMD součástky. Proto je důležité, aby pájené spoje plnily jak funkční parametry, tak i schopnost odolávat mechanickým a dalším vlivům. Zařízení se pro běžný spotřební život musí navrhovat tak, aby většinu z těchto možných příkladů namáhání a poškození přežilo. Proto je důležité zařízení podrobovat zkouškám a reálně otestovat jeho schopnost odolávat nepříznivým vlivům.

Pájené spoje a součástky se podílejí na funkčnosti celého zařízení. Proto je důležité, aby byly navrhnutы tak, aby nedošlo k žádné poruše. Na pájený spoj má vliv průběh přetavení (nastavení tepelných profilů), růst intermetalických vrstev a samozřejmě okolní podmínky. Proto jsem vybral termomechanické namáhání, které odpovídá namáhání okolního prostředí součástky a zároveň testuje odolnost výrobku v různých tepelných podmínkách.

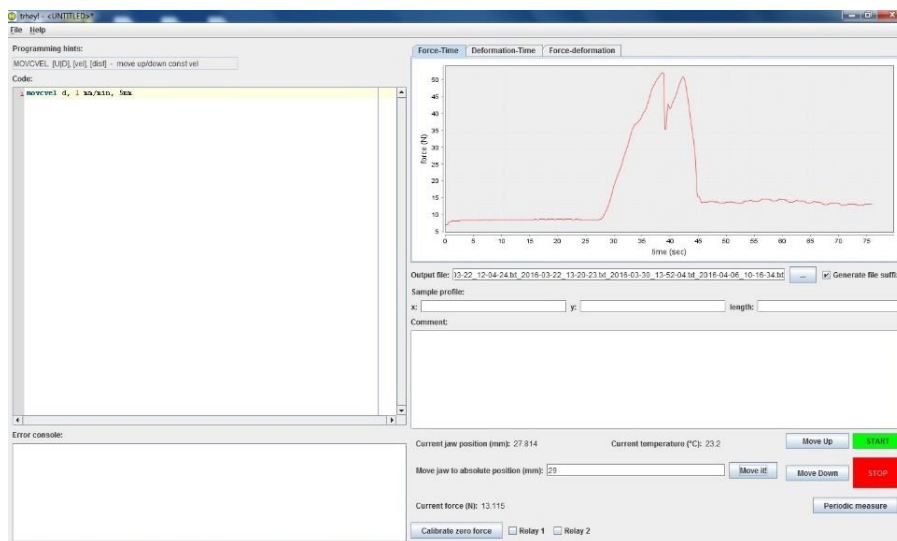
5.5.1 Testovací zařízení

Testování mechanické odolnosti proti smyku pájených spojů probíhalo na zařízení DEFORM 02 společnosti Pemar spol. s.r.o. v laboratořích katedry elektrotechnologie na ČVUT fakultě Elektrotechnické. Na následujícím obrázku č. 11 je trhačka s infrazářičem použitým při termomechanických zkouškách.



Obr. 11 – testovací zařízení pro mechanické zkoušky smykem s infrazářičem

Ovládání trhačky a snímání dat bylo zprostředkováno softwarem nazvaným „TRHEJ“, který sloužil ke komunikaci s trhačkou. V tomto softwaru se přímo řídila celá funkčnost trhačky. Dalo se v něm přímo nastavovat posun čelistí, posun čelistí s definovaným krokem za čas a také zde byly v průběhu testování zobrazeny aktuální silové údaje z aktuálního měření v závislosti na čase.



Obr. 12 – vizualizace prostředí

Na obrázku č. 12 je snímek ze softwarového prostředí ovládajícího a zaznamenávajícího průběh namáhacího experimentu. Jsou zde vidět ovládací prvky v pravém dolním rohu „stop“ a „start“ nad nimi zaznamenáván aktuální testovací průběh a vlevo okno pro zadávání příkazů.

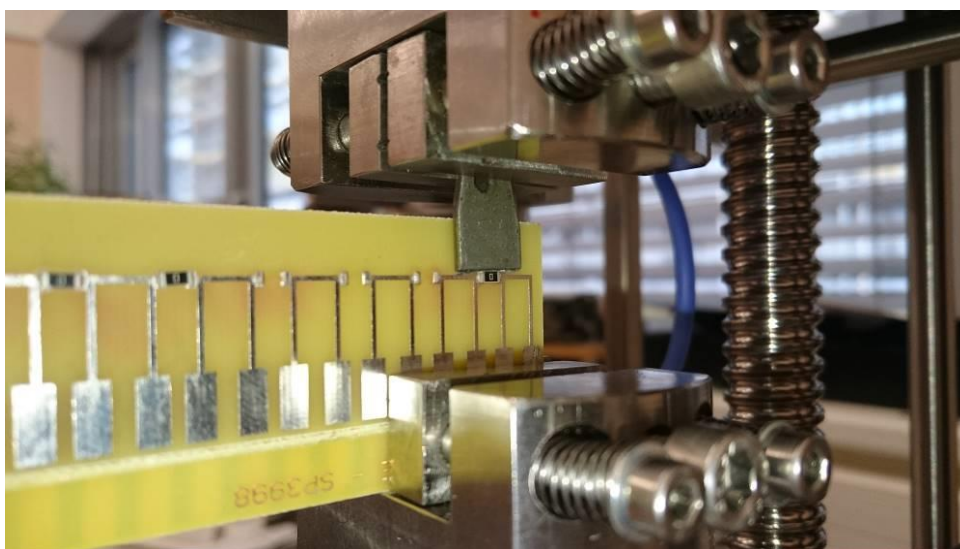
Na následujícím obrázku č. 13 je vypsán důležitý povel, který byl nastaven v softwaru, který udává posun čelisti o 1 milimetr za minutu o celkovém posunu 5mm. Pomocí toho to příkazu se čelisti trhačky automaticky posunovaly na cílenou hodnotu pozice v milimetrech.

```
movcvel d, 1 mm/min, 5mm
```

Obr. 13 – příkaz v softwaru

5.5.2 Metodika měření

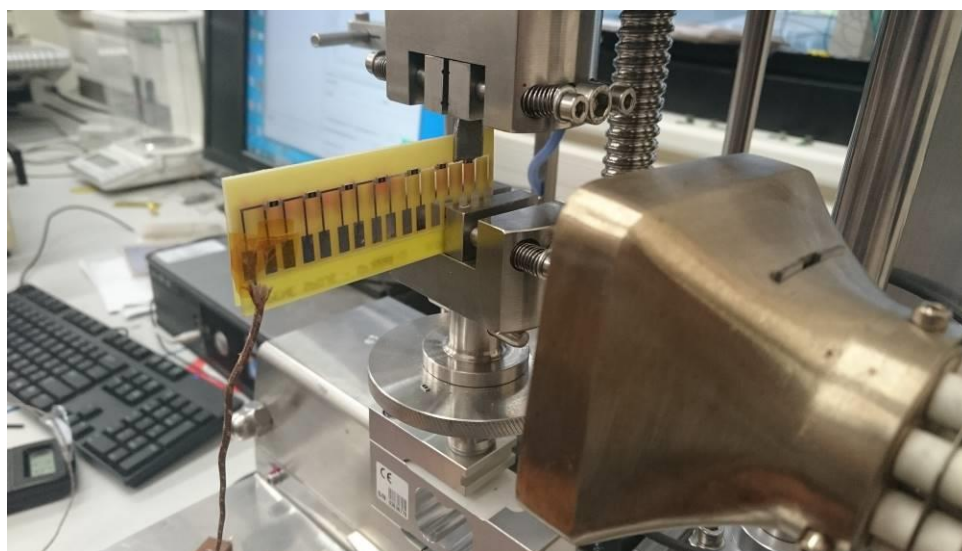
Pro měření síly ve smyku na SMD součástky bylo nutné vyhotovit tenký kus pevného materiálu z oceli (nazýváme ho přípravek), který tlačil na jednotlivé SMD součástky. Tento přípravek se upevnil pevně do čelistí, které se při mechanickém namáhání ve smyku pohybovaly proti desce plošného spoje. Naproti nim bylo potřeba umístit testovaný vzorek. Bylo důležité, aby přípravek neměl špatný sklon a netlačil do DPS namísto aby namáhal SMD odpor. Pro odstranění tohoto nežádoucího vlivu se vždy při posunu přípravku nad aktuálně testovanou součástku nechaly čelisti nedotažené a pomocí posunu čelisti se vyzkoušelo, jak se přípravek dotýká DPS a zároveň jak dosedne na SMD součástku viz. obr. 14



Obr. 14 – uchycení vzorku v čelistích

Měření namáhání smykem bylo rozděleno na dva pokusy. A to měření při okolní teplotě laboratoře, která činila zaokrouhlených 22°C a při zahřívání spojů infrazářičem 65°C. Pro obě tyto varianty bylo použito stejný počet vzorků. Vždy byl proveden experiment pro kombinace všech vybraných pájecích past, všech tří povrchových úprav a třech vytvořených teplotních profilů (2xpájecí pasta * 3xpovrchová úprava * 3teplotní profil = 18 DPS pro namáhání smykem a pro namáhání smykem s tepelným ohřevem spojů infrazářičem také po 18 kusech DPS). Jednotlivá DPS byla osázena sedmi SMD odpory.

U termomechanického namáhání se k trhačce přidal infrazářič, který byl umístěn tak aby zhruba z 5cm zářil tepelně na spoje DPS a tím zahříval spoje během testování. Na infrazářiči byla teplota nastavena přibližně na výkon pro 60°C. Tato teplota nebyla referenční, byla to hodnota výkonu, proto se na testovací desku připevnilo termočlánky pomocí kaptonové pásky k vodivým cestám tak, aby byly schopny změřit aktuální teplotu na vzorku. Termočlánky byly vyvedeny ke snímači teploty, kde se sledovala teplota. Jako testovací teplota, na kterou bylo potřeba zahřát testovací vzorek, byla vybrána teplota 65°C. Takto měřená teplota nebyla během celého procesu namáhání konstantní a měnila se vlivem tepelných kapacit atd. Mnou naměřená průměrná teplota ve většině případů při průběhem otestování 18 DPS x 7 SMD R1206 byla 68°C.



Obr. 15 – detail zkušební sestavy

Teplota byla měřena pomocí termočlánků připojených k teploměru pomocí kaptonové pásky viz obr. 15.

5.5.3 Výsledná data

Ukládání průběhu mechanické zkoušky ve smyku probíhalo pomocí datového spojení s příslušným počítačem a softwarem. Data byla zaznamenávána po malých časových intervalech řádově mikrosekund s působící silou na vzorek a s posunem čelistí. Příslušný software v průběhu měření vytvářel a zobrazoval průběh síly tlačící na vzorek.

Data byla rovnou ukládána do textového souboru. Pro posuzování naměřených dat se musely data přesunout a naimportovat do programu Microsoft Excel, kde se udělaly nezbytné úpravy pro následné výpočty. Ze všech variant vzorků se vytvořil dokument programu Microsoft Excel, s tabulkou maximálních hodnot při přetržení vzorku. Z těchto tabulek s hodnotami se následně vytvořil další dokument programu Microsoft Excel pro vytvoření přehledných tabulek pro jednotlivé kombinace povrchových úprav, teplot přetavení a pájecích slitin.

5.5.4 Data

Z naměřených hodnot síly působící na vzorek ve smyku byly důležité maximální hodnoty síly odtrhu pro jednotlivé vzorky na kombinaci DPS s povrchovou úpravou a teplotními profily. Pro výsledné porovnání je nutné vytvořit z těchto dat výslednou tabulku a vypočítat průměrné hodnoty maximální síly v době přetržení a k nim dopočítat směrodatnou odchylku. Následující rovnice byla použita pro výpočet aritmetického průměru a jako součást výpočtu směrodatné odchylky..

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (9)$$

Další hodnota, která se musela vypočítat pro vypovídající výsledky rozložení a přesnosti je směrodatná odchylka.

Směrodatná odchylka je ve statistice a pravděpodobnosti používána jako míra statistické disperze. Je to kvadratický průměr odchylek hodnot od jejich kvadratického průměru. Směrodatná odchylka vypovídá o tom, jak se moc od sebe liší typické případy souboru zkoumaných čísel. Velikost hodnoty směrodatné odchylky určuje, jak si jsou prvky v souboru hodnot podobné. Je-li malá, jsou prvky v souboru podobné, je-li velká, signalizuje velké odlišnosti naměřených hodnot, velký rozptyl největší a nejmenší hodnoty.

Pro směrodatnou odchylku σ platí vztah:

$$\sigma = \sqrt{D(X)} = \sqrt{\text{var}(X)} \quad (10)$$

Kde: $D(X)$ – rozptyl náhodné veličiny X

Dále rozepsáno:

$$\sigma = \sqrt{E((X - E(X))^2)} = \sqrt{E(X^2) - (E(X))^2} \quad (11)$$

Kde: $E(X)$ – střední hodnota

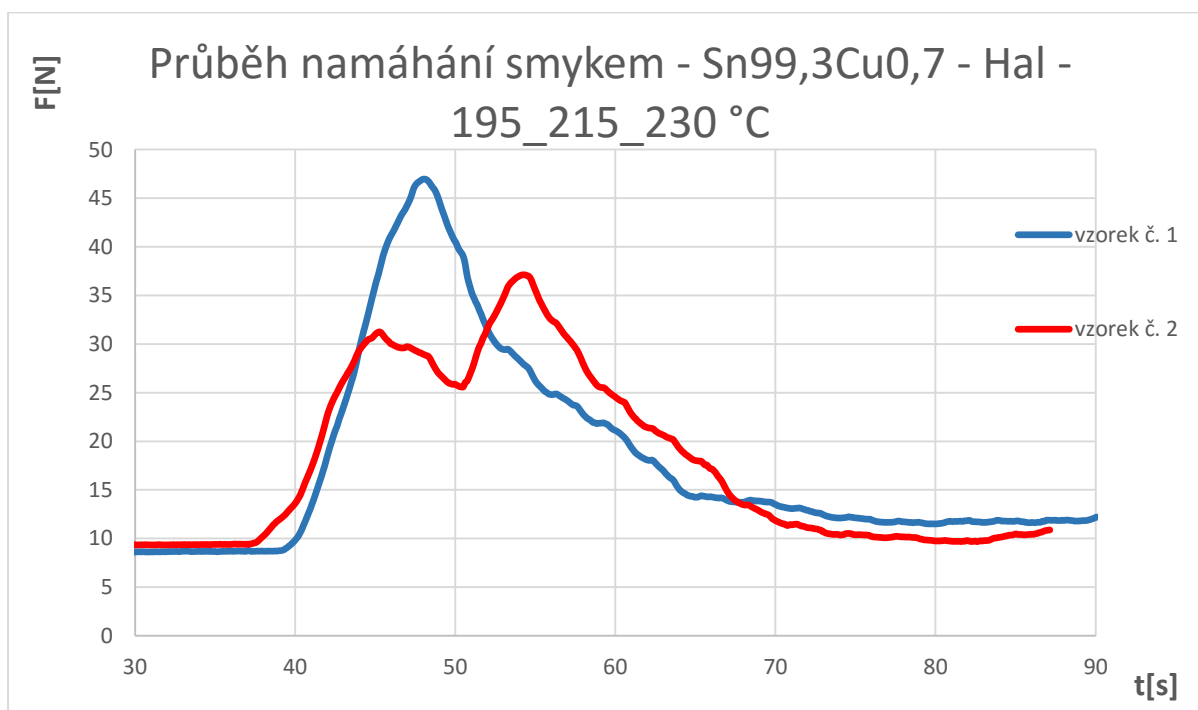
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

Kde: \bar{x} – aritmetický průměr

6 Výsledné data a zhodnocení

6.1.1 Názorný průběh testování

Na následujícím grafu č. 11 můžeme vidět typický průběh namáhání testovaného vzorku silou ve smyku. Ukázka průběhu je na povrchové úpravě HAL a pájecí slitině Sn99,3Cu0,7 s termomechanickým namáháním za pomoci infrazářiče. Takto jsem naměřil celkově 252 podobných průběhů mechanického namáhání (36 desek plošných spojů x 7 součástek odporů R1206), kdy pro tuto diplomovou práci je důležitá maximální hodnota síly v době přetržení. Všechny hodnoty maximálních sil v době přetržení vzorku jsou vypsány v tabulkách v části příloh. Na následující stránce je vytvořena výsledná tabulka č. 3 z těchto hodnot.



Graf 11 - časový průběh síly působící na dva vzorky

Ze zmíněné kombinace byly vybrány dva ze sedmi vzorků pro přehlednost. Jsou zde vidět dva typy průběhů, které jsem změřil. Jedním typem je pro vzorek č. 1 modrý průběh, kdy k odtržení součástky došlo rázově, proto zde můžeme vidět jednu maximální hodnotu síly. U druhého vzorku došlo nejprve k odtržení jedné strany pájeného spoje součástky a pak následovala druhá strana, což je zřejmé a viditelné na druhém vrcholu síly. Poté nastává pokles potřebné síly, který je zapříčiněn odtržením. Na začátku testování a na konci testování můžeme pozorovat konstantní sílu, kde na konci mechanické zkoušky je patrná vyšší hodnota síly než na začátku. Je to zapříčiněno třením odtržené součástky o povrch DPS.

6.1.2 Vypočtené a naměřené hodnoty

Následující tabulka č. 3 zahrnuje průměrné hodnoty z naměřených dat termomechanických zkoušek a vypočtených hodnot směrodatných odchylek ke vzorkům.

Tabulka 3 - výsledné zprůměrované síly se směrodatnou odchylkou

povrchové úpravy		CU		ENIG		HAL		
parametry nastavení pece T[°C]	Teplota při zkoušce T [°C]	průměrná hodnota síly na přetržení F[N]	směrodatná odchylka	průměrná hodnota síly na přetržení F[N]	směrodatná odchylka	průměrná hodnota síly na přetržení F[N]	směrodatná odchylka	
Sn-Bi	110-130-145	20	59,089	8,062	50,315	2,684	45,955	10,036
		65	58,705	10,199	61,378	12,232	41,503	12,348
	110-130-155	20	63,659	7,142	58,702	11,801	74,594	10,480
		65	58,719	8,981	60,999	11,625	54,723	5,925
	110-130-165	20	69,111	6,996	77,793	11,680	60,918	9,685
		65	57,366	6,814	57,256	8,431	41,963	3,289
Sn-Cu	195-215-230	20	48,770	5,705	47,058	6,586	51,363	5,420
		65	47,225	5,401	52,791	4,110	42,061	4,447
	195-215-240	20	49,418	4,060	51,829	4,628	49,225	4,720
		65	51,172	7,620	52,854	7,560	51,139	3,009
	195-215-250	20	52,663	7,266	49,545	3,497	46,768	2,895
		65	38,669	9,335	52,990	6,270	46,551	7,024

Tabulka č. 3 je rozčleněná podle povrchových úprav a pájecích slitin. Dále se rozděluje podle nastavených teplotních profilů a také dle zátěže při experimentu silou ve smyku na laboratorní teplotu nebo při ohřevu infrazářičem.

V předešlém textu bylo vysvětleno, co znamená směrodatná odchylka. Směrodatná odchylka je důležitá a říká nám, s jakou rozdílností byly naměřeny hodnoty zkoušky smykem. Zde jsou vidět průměrné hodnoty s jejich vypočtenými směrodatnými odchylkami. V následujícím textu zhodnotím výsledky průměrných hodnot, ale samozřejmě tyto výsledky je nutné ponechat s určitým odstupem, jelikož je důležité také klást velkou pozornost hodnotám vypočtených odchylek.

Z tabulky lze vypočítat několik faktů. Při porovnání mechanických odolností pro pájecí slitiny Sn42Bi58 a Sn99,3Cu0,7 je patrné, že Sn99,3Cu0,7 pájka v tomto poměru vyšla s menší mechanickou odolností oproti bismutové slitině, kdy rozdíl maximální velikosti síly v odtržení byl zaznamenán v některých případech až o desítky procent. Např. pro Cu povrchovou úpravu a pro teplotní profil s nejvyšší dosaženou max. teplotou je síla na přetržení u bismutové slitiny $F_{\max}=69\text{N}$ za to pro druhou slitinu a stejnou úpravu, pro přetavovací profil s nejvyšší dosaženou max. teplotou je $F_{\max}=52,6\text{N}$. Z toho lze vypočítat, že pro Sn42Bi58 pájecí pastu byl nastaven heating factor dobře a nedošlo ke vzniku a tvorbě příliš široké IMC vrstvy, která by snižovala pevnost spoje, v případě Sn99,3Cu0,7 tomu bylo naopak.

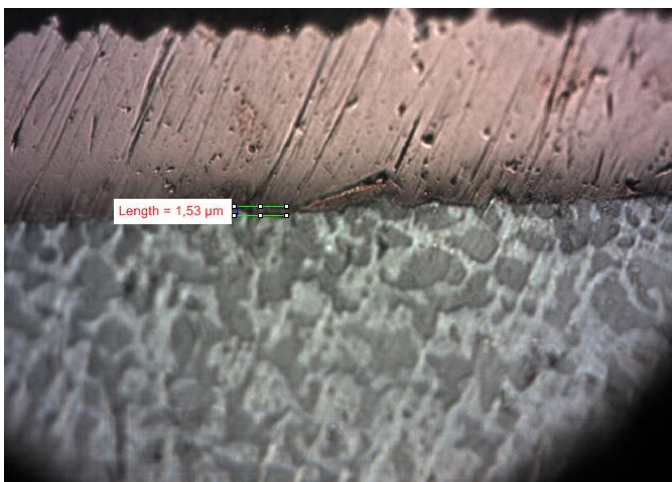
Z naměřených výsledků je pozorovatelná rozdílnost velikosti síly při přetržení pro nastavené teplotní profily. Pro první ze zmiňovaných pájek tedy bismutovou lze vypočítat, že s vyšším integrálem teploty nad přetavovací teplotou roste pevnost spojů. Při tepelném namáhání toto neplatí, u vyšších teplotních profilů klesá síla na přetržení.

Pro druhou pájku platí vzestup mechanické pevnosti ve smyku pouze u Cu povrchové úpravy. U dalších úprav je klesající tendence. Je tedy patrný vliv odlišnosti povrchové úpravy na vytvoření struktury spoje a jeho stabilitu.

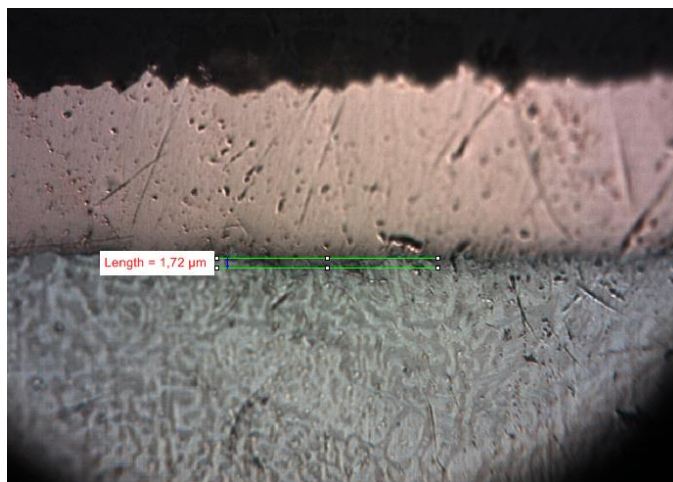
6.2 Zhodnocení vybraných intermetalických vrstev

V této části diplomové práce zhodnotím jednotlivé struktury pájených spojů výbrusy pomocí mikroskopu a optické analýzy.

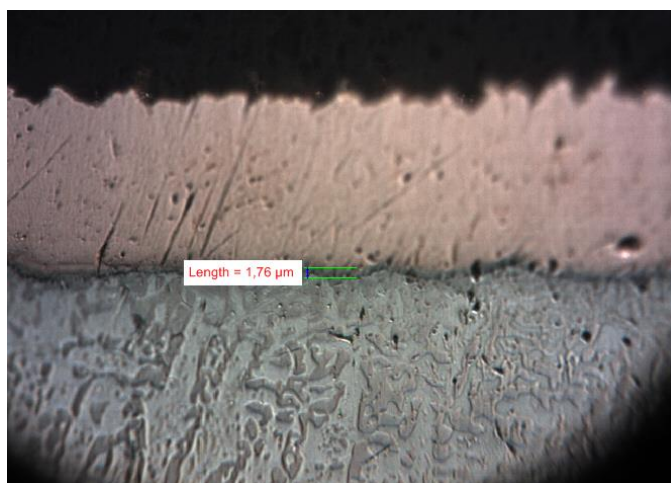
6.2.1 Sn42Bi58 – Cu povrchová úprava



Obr. 16 – výbrus, Sn42Bi58, Cu povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/145 °C



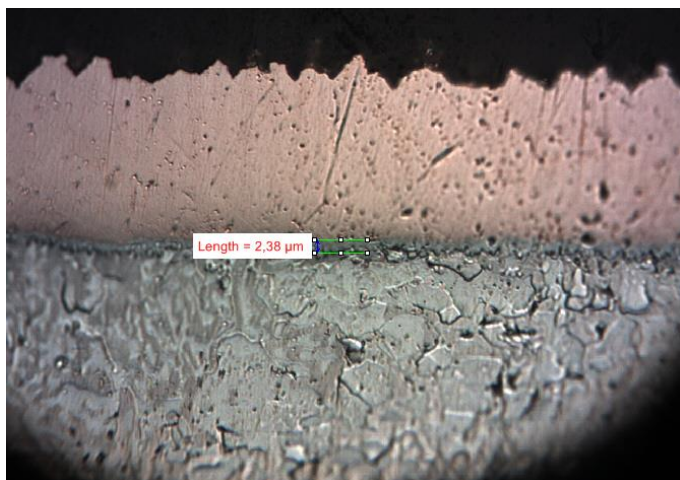
Obr.17 - výbrus, Sn42Bi58, Cu povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/155 °C



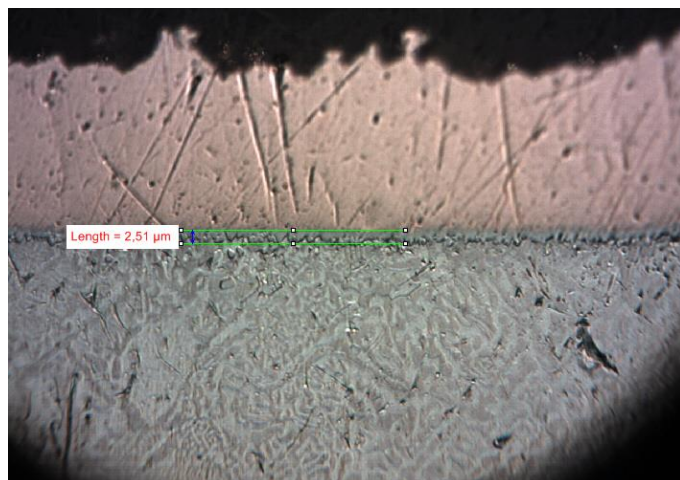
Obr. 18 - výbrus, Sn42Bi58, Cu povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/165 °C

Výše na uvedených obrázcích obr. 16 – 18 můžeme pozorovat strukturu pájených spojů zapájených pájecí slitinou Sn42Bi58 s Cu povrchovou úpravou s třemi přetavovacími profily (heating factory). Na výbrusu je vidět IMC vrstva mezi povrchem a pájkou. Můžeme zde pozorovat nepatrný nárůst velikosti vrstvy s velikostí přetavovací teploty. Intermetalikum ovlivňuje mechanické vlastnosti pájeného spoje, ale zároveň může zvyšovat pružnost. Pokud se podíváme na tab. 3 viz. výše je patrné že v tomto případě, kdy IMC vrstva se nepatrně zvětšovala s rostoucí teplotou vidíme, že pevnost spoje se také zvyšovala. Pro obr. č. 16 činila síla na přetržení 59N tak pro obr. č. 17 tato hodnota dosáhla 63,7N, a pro poslední snímek z trojice až 69N.

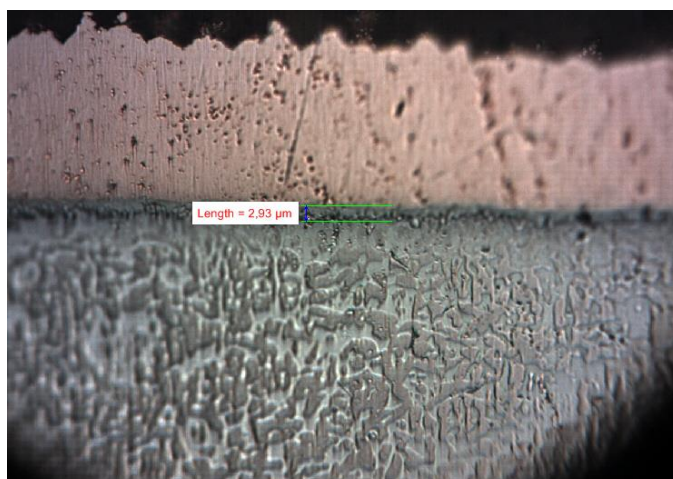
6.2.2 Sn42Bi58 – HAL povrchová úprava



Obr. 19 - výbrus, Sn42Bi58, HAL povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/145 °C



Obr. 20 - výbrus, Sn42Bi58, HAL povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/155 °C

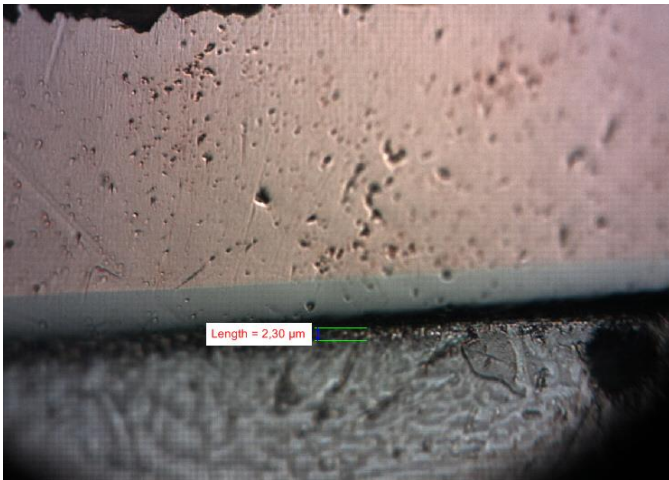


Obr 21 – výbrus, Sn42Bi58, povrchová úprava HAL – parametry nastavení pece: 110/130/165 °C

Na snímcích obr. 19-21 jsou zobrazeny výbrusy pájených spojů na rozhraní povrchové úpravy HAL s pájecí slitinou Sn42Bi58 .

Jako u předchozí kombinace je zde vidět nárůst intermetalika na rozhraní povrch - pájka. Vizualně je tato vrstva o poznání širší řádově o 0,5 – 1 μm než u kombinace s Cu povrchovou úpravou. To vypovídá o získaných teoretických poznatcích o odlišné reakci a vytvoření jiných mezivrstev. Z pohledu mechanických zkoušek je zde vidět nárůst síly potřebné na přetržení součástky. Pro obr.19 byla naměřená síla 46N, pro obr. 20 byla naměřená hodnota 74N a pro obr. 21 hodnota 61N. Z těchto hodnot se dá usoudit, že při růstu IMC do určité hodnoty se zvyšuje pevnost a pružnost spoje, ale při překročení určité velikosti má IMC vrstva naopak negativní vliv na pevnost spoje.

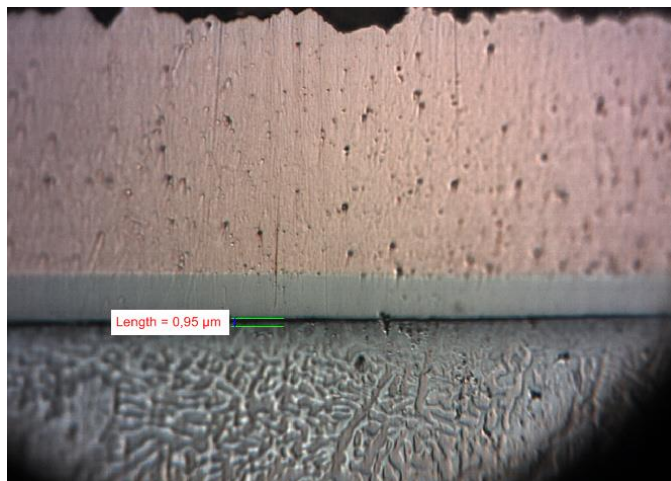
6.2.3 Sn42Bi58 – ENIG povrchová úprava



Obr. 22 - výbrus, Sn42Bi58, ENIG povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/145 °C



Obr. 23 - výbrus, Sn42Bi58, ENIG povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/155 °C

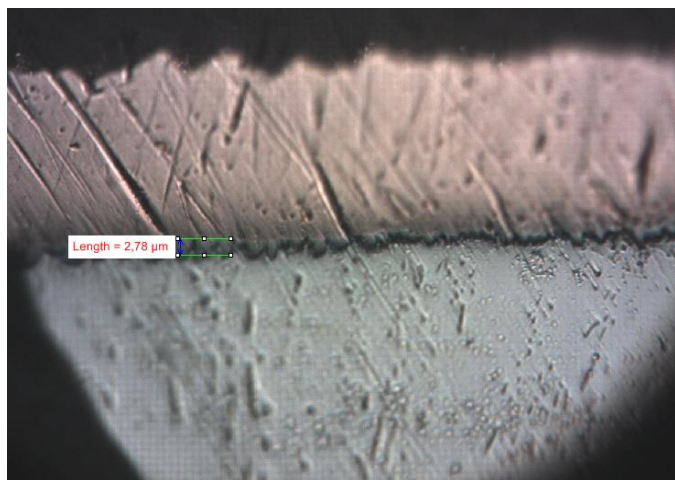


Obr. 24 - výbrus, Sn42Bi58, ENIG povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/165 °C

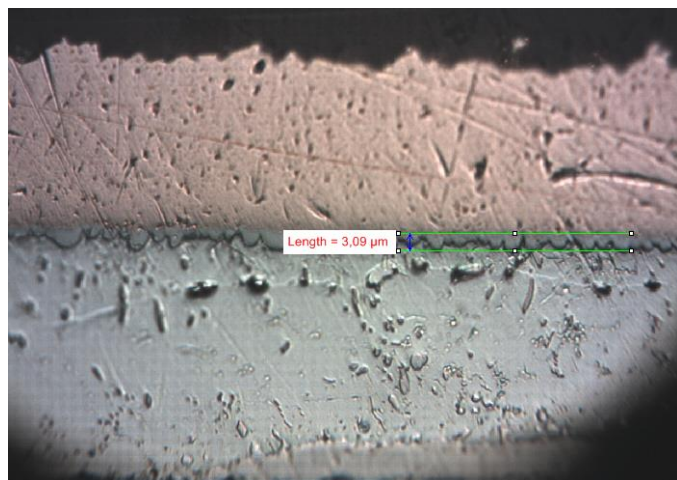
Na snímcích obr. 22 - 24 jsou zaznamenané struktury spojů mezi Sn42Bi58 pájkou a povrchovou úpravou ENIG.

Je zde ukázkově vidět odlišnost struktury od předešlých kombinací pájky s jednotlivými úpravami. Je zde zobrazena rovná vrstva niklu. Důležitým faktem z těchto snímků je zřejmá miniaturní vrstva intermetalika. Z pohledu maximálních sil na přetržení je zde vidět velký nárůst s růstem teplotního profilu. Pro obr. 22. s teplotou přetavení 145°C byla změřená maximální průměrná síla při přetržení 50N, za to pro obr. 23. a o 10°C vyšší teplotou přetavení byla zaznamenána síla 58,7N, pro poslední obr. č. 24 činila maximální síla při přetržení 77N.

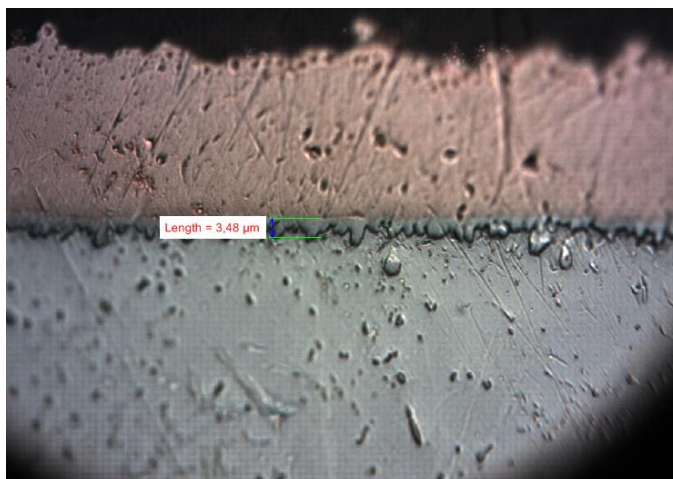
6.2.4 Sn99,3Cu0,7 – Cu povrchová úprava



Obr. 25 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, Cu povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/230 °C



Obr. 26 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, Cu povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/240 °C



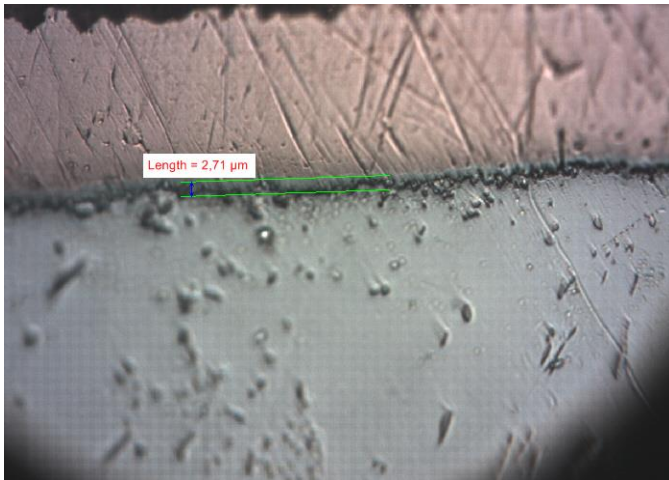
Obr. 27 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, Cu povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/250 °C

Na těchto snímcích je zaznamenána struktura spoje mezi Cu povrchovou úpravou a druhou vybranou pájecí slitinou Sn99,3Cu0,7.

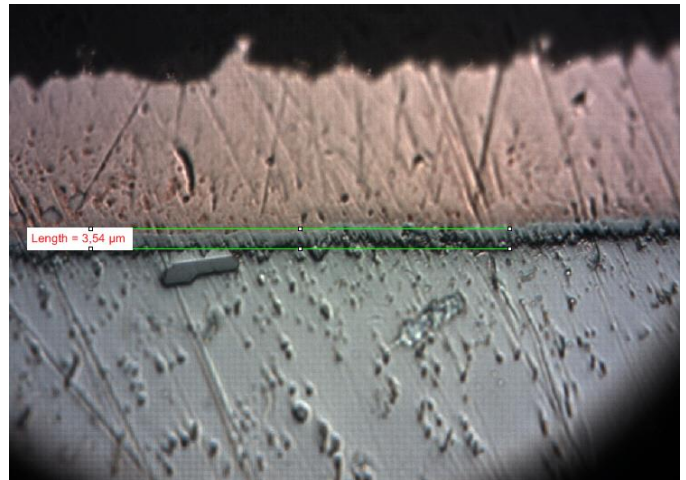
Už na první pohled je vidět rozdíl této kombinace vůči kombinaci povrchové úpravy s bismutovou slitinou v nárůstu velikosti intermetalické vrstvy. Jako další rozdíl je samozřejmě vidět odlišnost struktury pájky v podobě drsnosti a struktury vrstev. Je zde zřejmé, že IMC vrstva je zde téměř dvakrát větší než u bismutové slitiny dosahuje až 3,48μm. Je to zapříčiněno rozdílnými teplotami přetavení a odlišným složením pájky. Ze snímku vidíme nárůst velikosti IMC vrstvy podle nastavených teplot přetavení, kdy první vzorek obr. 25 byl přetaven 230°C druhý obr. 26 240°C a poslední obr. 27 250°C.

Vliv mezi vrstvy na pevnost spoje je z tabulky č. 3 nepatrný. Změřeno bylo pro obr. 25 – 48N, pro obr. 26 – 49N a pro obr. 27 – 52N.

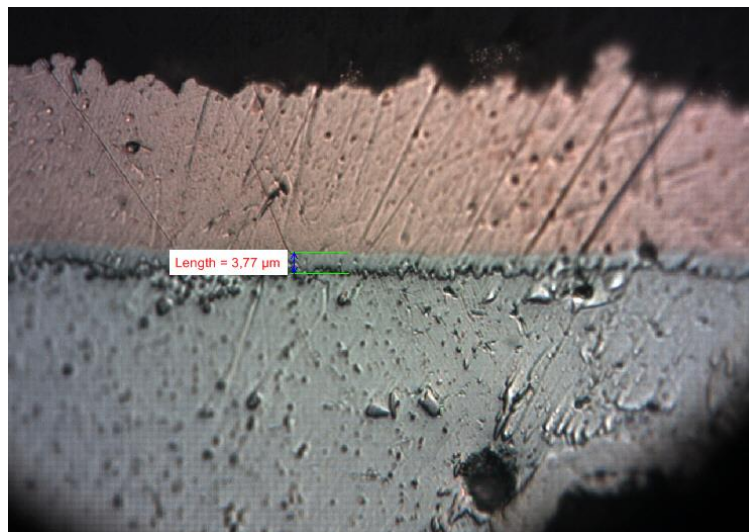
6.2.5 Sn99,3Cu0,7- HAL povrchová úprava



Obr. 28 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, HAL povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/230 °C



Obr. 29 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, HAL povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/240 °C

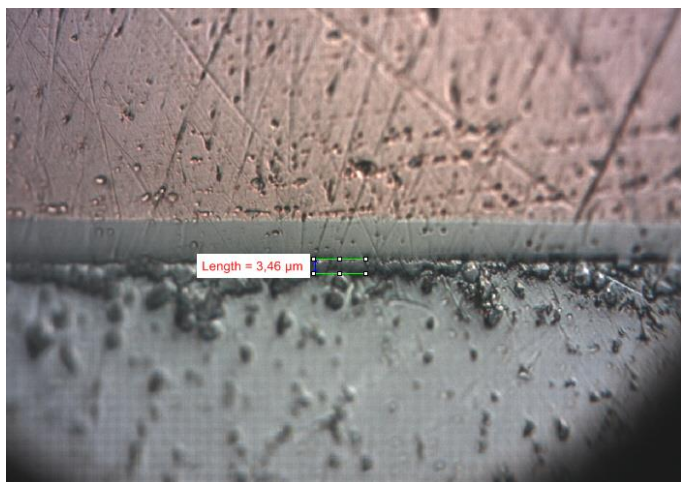


Obr. 30 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, HAL povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/250 °C

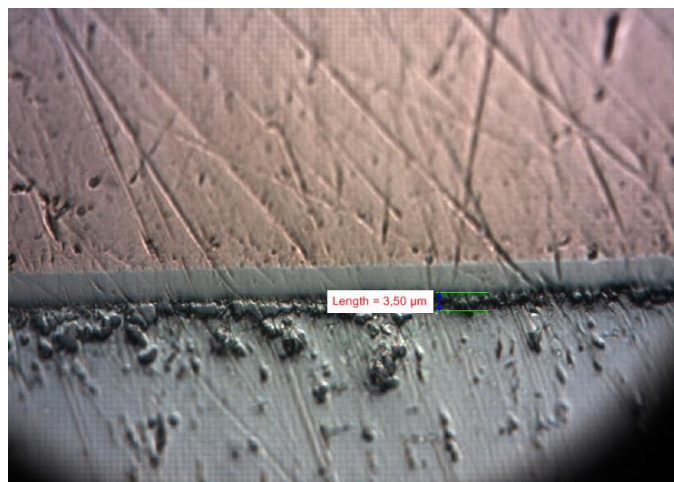
Na obr. 28 – 30 je zobrazena struktura pájecí pasty Sn99,3Cu0,7 s HAL povrchovou úpravou.

Je zde vidět velký nárůst struktury intermetalika s rostoucí nastavenou přetavovací teplotou z 230°C na 240°C o cca 30%. Další růst IMC vrstvy je pouze o 0,2μm. Z mechanické zkoušky smykem je patrná závislost vlivu růstu IMC na snižování pevnosti. Z toho vyplývá, že v tomto případě IMC vrstva snižuje pevnost spoje, kdy spoj má nejvyšší pevnost při nižším Heating factoru.

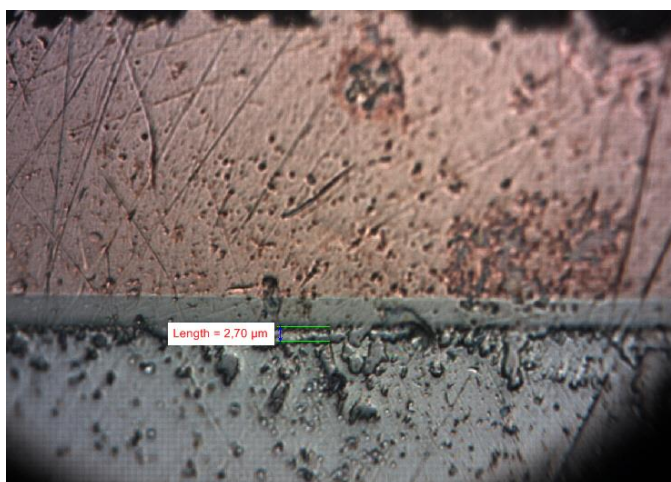
6.2.6 Sn99,3Cu0,7-ENIG povrchová úprava



Obr 31 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, ENIG povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/230 °C



Obr. 32. výbrus, Sn99,3Cu0,7, ENIG povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/240 °C



Obr. 33 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, ENIG povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/250 °C

Na předchozích obrázcích obr. 31 – 33 je spoj mezi Sn99,3Cu0,7 pájecí pastou a povrchovou úpravou ENIG.

U poslední kombinace je vidět největší rozdíl struktury mezi pájecími pastami Sn42Bi58 a zde prezentovanou Sn99,3Cu0,7. Tato povrchová úprava nevytvářela s bizmutovou slitinou téměř žádné IMC vrstvy. V tomto případě je zde vidět velká nečistota struktury s výběžky intermetalické vrstvy někdy až desítky mikro metrů. S růstem Heating factoru se následně snižuje pevnost od hodnoty 240°C

7 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala termomechanickými zkouškami, Heating factorem a možným růstem intermetalických vrstev při procesu pájení. Celé zhotovení vzorků a proměření probíhalo na zařízeních v laboratořích ČVUT v Praze. Konkrétně byla použita přetavovací pec, mechanická trhačka a mikroskop s obrazovou analýzou.

Teoretická část diplomové práce byla zaměřena na popis technologie pájení a přiblížila technologii přetavení použitou při vypracování této práce. Následně byla věnována pozornost povrchové montáži a povrchovým úpravám pájecích plošek. Toto bylo velmi důležité vzhledem k použitým pájkám a růstu intermetalických vrstev. Dále jsem se zabýval vznikem zmíněných intermetalických sloučenin a mezivrstev, integrálem teploty a času nad teplotou přetavení a spojitostí mezi tímto jevem a růstem intermetalických vrstev. Na konci teoretické části jsem popsal metodologii mechanických a termomechanických zkoušek, kterou jsem v praktické části aplikoval.

V praktické části jsem vytvořil návrh testovací desky plošného spoje pro pájecí a testovací účely. Návrh desky obsahoval základní testovací motiv vhodný pro vypracování praktické části diplomové práce. Každá deska byla vyhotovena pro sedm odporů velikosti 1206. Celkově bylo pro tuto diplomovou práci vytvořeno 36 kusů desek plošných spojů a následně termomechanicky namáháno. Desky byly vyrobeny ve třech povrchových úpravách, konkrétně Cu, ENIG, HAL pro možnosti kombinace a porovnání s různými odlišnými typy pájecích past, které byly vybrány pro svojí různorodost použití a složení.

Dále jsem v praktické části pokračoval popisem kompletního zhotovení vzorků. To obnášelo nanesení pájecí pasty pomocí šablony, následně osázení součástkami a přetavení v peci. Pro proces přetavení jsem vybral tři teplotní profily pro každou pájecí pastu tak, aby se mohly posuzovat změny Heating factoru, který byl podrobně popsán v teorii. Pak jsem provedl mechanické zkoušky vzorků na trhačce, při kterých jsem zároveň zkoumal termomechanickou odolnost spojů. Zkoušky jsem realizoval pro všechny kombinace pájky, povrchové úpravy a teplotního profilu. Po otestování všech vzorků jsem přešel k přípravě vzorků pro výbrusy, které jsem podrobil optické a obrazové analýze.

U termomechanické zkoušky smykem jsem u mnou zkoumaných vzorků vyvrátil v teorii zmíněný předpoklad, že spoje zapájené pájecí slitinou Sn99,3Cu0,7, kde měď má v tomto poměru přidávat na pevnosti spoje, budou dosahovat lepších mechanických výsledků při namáhání. Z naměřených hodnot je patrné, že ve většině případů vyšla z pohledu mechanické odolnosti lépe bismutová slitina a to řádově o jednotky a v některých případech i desítky procent.

Dalším porovnávaným faktorem byl integrál času a teploty nad teplotou přetavení neboli výše zmíněný heating factor. Pro Sn42Bi58 slitinu lze usoudit, že s vyšší přetavovací teplotou v mnou zvolených mezích je vidět nárůst pevnosti spoje. Za to pro kombinaci se slitinou Sn99,3Cu0,7 to platí pouze pro Cu povrchovou úpravu. U dalších povrchových úprav je vidět klesající tendence, což potvrzuje teoreticky nabitě informace o různosti povrchových úprav, vlastnostech a jejich reakci při kombinaci s pájecími slitinami.

Při termomechanickém namáhání se zahříváním infrazářičem pro bismutovou pájku s povrchovými úpravami Cu a HAL je nižší síla na přetržení vzorku než při normální teplotě. U povrchové úpravy ENIG tomu tak není. U druhé pájky (Sn99,3Cu0,7) byla mnou naměřená pevnost při namáhání téměř totožná pro zkoušku s tepelným zářičem i bez něj. Zde uvedené poznatky jsou pravděpodobné z důvodu nižší přetavovací teploty pro bismutovou slitinu a tím pádem mnohem vyšší ovlivnitelnost spoje při zahřátí infrazářičem.

Na vyhotovených výbrusech je zobrazena detailní struktura spojů pro všechny kombinace. Na obrázcích je jasně viditelná intermetalická vrstva. Pro všechny případy kromě vzorků s ENIG povrchovou úpravou je patrný nárůst intermetalické vrstvy v závislosti na integrálu teploty a času. V některých případech je vidět nárůst vrstvy až o desítky μm . U zmiňované povrchové úpravy ENIG pro Sn48Bi58 pastu téměř nenarostla intermetalická vrstva. Může to být zapříčiněno reakcí kombinace nikl - zlato s bismutem.

Z pořízených snímků pro všechny kombinace povrchových úprav je patrný veliký nárůst intermetalické struktury u Sn99,3Cu0,7 pájky oproti Sn42Bi58 pájce a proto vyšly mechanické zkoušky smykem lépe pro druhou ze zmiňovaných pájek. Potvrdily se teoretické předpoklady, že intermetalická vrstva je nedílnou součástí pájených spojů a do určitých mezí zvyšuje mechanické vlastnosti spojů, ale při velkém růstu má naopak negativní vlastnosti na spolehlivost spoje.

Ze získaných poznatků během praktické části diplomové práce vyplývá několik závěrů. Ze zkoumaných vzorků lze s jistotou říci, že při zvyšující se teplotě nad teplotou přetavení narůstá intermetalická vrstva, je tedy patrné, že ve specializovaných výrobních elektroniky je důležité dát nemalou pozornost a úsilí na přesné nastavení teplotního profilu pro výroby. Dále je patrný vliv kombinace pájecí slitiny a povrchové úpravy na mechanickou odolnost spoje. Lze tedy říci, že pro každou aplikaci je vhodná jiná kombinace, jelikož s každou kombinací povrchových úprav, slitin a teplotních profilů narůstá intermetalická vrstva jinak a to pak ovlivňuje elektrické a mechanické vlastnosti spoje a dále jejich spolehlivost.

V dalších akademických pracích by bylo vhodné se zabývat podrobnějším růstem intermetalických vrstev. Konkrétně by stálo za to vytvořit více teplotních profilů, tak aby bylo možné učinit přesnější závěry, pozorovat růst intermetalických vrstev a přidat například zkoumání elektrických vlastností spojů.

U termomechanických zkoušek by stálo za úvahu přidat namáhání ještě s vyšší teplotou. Zároveň by bylo zajímavé prozkoumat vlastnosti pájených spojů při záporných hodnotách mechanického namáhání.

Literatura

- [1] Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike. 1. vydanie. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [2] Montážní a propojovací technologie MMOT. Brno, 2011. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing Jiří Starý, Ph.D., Ing. Miroslav zatloukal, Ing Petr Stejskal.
- [3] Technologie a spolehlivost pájeného připojení elektronických modulů a součástek popovrchovou montáž [online]. Brno, 2010, 2010 [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-4221-4.pdf>. Vědecké spisy vysokého učení technického v Brně. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Josef Šandera, Ph.D
- [4] A reflow soldering retro-design system for rework station based on Q-factor [online]. Shanghai Jiao Tong University, P.R. China, 2005, 2005 [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1452315&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1452315. Advanced Electronic Manufacturing Center, School of Mechanical Engineering, Jiao Tong university, P.R. China. Vedoucí práce X.J. Sheng, Han Ding.
- [5] JEŽEK, Vladimír. Vliv Integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje [online]. Brno, 2015, 2015 [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=101590. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [6] ŠVECOVÁ, Ing. Olga. Spolehlivost bezolovnatých pájek a vybrané způsoby odhadu jejich životnosti. Brno, 2012. Doktorská. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.
- [7] Měkké pájení I: vodiče a vývodové součástky. Zlín, 2009. Projekt. Internetový portál elektrotechnika. Vedoucí práce Neuveden.
- [8] Tao Bo, Yin Zhouping, Ding Han, Wu Yiping, Reflow profile optimization of μ BGA solder joints considering reflow temperature and time coupling. Dostupné z WWW: <http://dx.doi.org/10.1108/09540910910989420>
- [9] LUCAS, J.P. a H. RHEE. Mechanical Properties of Intermetallic Compounds Associated with Pb-Free Solder Joints Using Nanoindentation. Journal of ELECTRONIC MATERIALS [online]. 2003, roč. 12, č. 32 [cit. 2015-25-12]. Dostupné z: http://guofuedu.org/data/upload/LucasHREE-IMC_ZEEOk2.pdf
- [10] Povrchová montáž [online]. Praha, neznám, 2015 [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: https://moodle.dce.fel.cvut.cz/pluginfile.php/4691/mod_resource/content/2/Povrchova_montaz.pdf. Výukový materiál. České vysoké učení technické v Praze.
- [11] BERAN, Tomáš. Porovnání olovnaté a bezolovnaté pájení. Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Karel Dušek, Ph.D.
- [12] Pietriková A., Ďurišín J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

- [13] Pájení přetavením. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2013 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1jen%C3%AD_p%C5%99etaven%C3%ADm
- [14] Subramanian K.: Lead-free Solders : Materials Reliability for Electronics, 2012, Wiley, ISBN:9780470971826
- [15] Karl J. Puttlitz, Kathleen A. Stalter: Handbook of Lead-free Solder Technology, ISBN: 9780824748708
- [16] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [17] Multimediální výukový systém: Pájení v elektrotechnice. Multimediální učebnice [online]. Brno: VUT, 2010 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice/>
- [18] Eutektikum. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2013 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Eutektikum>
- [19] JF - solder. JF-Solder [online]. China, 2008 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://jfsolder.com/product-3-4-sn42bi58-lead-free-solder-paste-en/146125>
- [20] ROZTĚKAVOST BEZOLOVNATÝCH PÁJEK NA KERAMICKÝCH SUBSTRÁTECH. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Adámek, Ph.D.
- [21] Povrchové úpravy: Povrchové úpravy. Gatema [online]. Boskovice, 2015 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://pcb.gatema.cz/povrchove-upravy-0/>
- [22] J. Starý, P. Kahle, Plošné spoje a povrchová montáž. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. 208 stran
- [23] Pájení a bezolovnaté pájky, Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc., dostupné z <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf> [cit 20.11.2009]
- [24] Mistral 260/360. Garoma [online]. Okružní 29a, Brno: Garoma Plus s.r.o, 2016 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.garoma.cz/katalog/letovani-a-smd/pretavovaci-pece/mistral-260360_5259d3da9cd56.html
- [25] KIC 2000 Hardware and Software User Manual. Manual [online]. San Diego, Ca 92127 USA, 2010, 2010(version 3.0.0.x), 1. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://kicthermal.com/wp-content/uploads/2015/12/KIC-2000-v3000-User-Manual.pdf>

Seznam obrázků

Obr. 1 - Schematický přehled typů pájecích technologií	12
Obr. 2 - Schéma metod pájení přetavením.....	13
Obr. 3 - Kondenzační pájení schéma [17].....	15
Obr. 4- technologie SMT příklady usazení součástek [10].....	17
Obr. 5 – montáž THT [7]	18
Obr. 6 - fázové rozhraní intermetalické struktury na rozhraní měď – pájka [23]	35
Obr. 7 – návrh testovací DPS (rozměry v mm).....	40
Obr. 8 – horkovzdušná pec Mistral 260	42
Obr. 9 - profilometr KIC explorer.....	43
Obr. 10 – softwarové prostředí SLIMKIC 2000	43
Obr. 11 – testovací zařízení pro mechanické zkoušky smykem s Infrazářičem	47
Obr. 12 – vizualizace prostředí	47
Obr. 13 – příkaz v softwaru	48
Obr. 14 – uchycení vzorku v čelistích.....	48
Obr. 15 – detail zkušební sestavy.....	49
Obr. 16 – výbrus, Sn42Bi58, Cu povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/145 °C	55
Obr.17 - výbrus, Sn42Bi58, Cu povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/155 °C	55
Obr. 18 - výbrus, Sn42Bi58, Cu povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/165 °C	55
Obr. 19 - výbrus, Sn42Bi58, HAL povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/145 °C	56
Obr. 20 - výbrus, Sn42Bi58, HAL povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/155 °C	56
Obr 21 – výbrus, Sn42Bi58, povrchová úprava HAL – parametry nastavení pece: 110/130/165 °C	56
Obr. 22 - výbrus, Sn42Bi58, ENIG povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/145 °C	57
Obr. 23 - výbrus, Sn42Bi58, ENIG povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/155 °C	57
Obr. 24 - výbrus, Sn42Bi58, ENIG povrchová úprava – parametry nastavení pece: 110/130/165 °C	57
Obr. 25 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, Cu povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/230 °C	58
Obr. 26 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, Cu povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/240 °C	58
Obr. 27 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, Cu povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/250 °C	58
Obr. 28 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, HAL povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/230 °C	59
Obr. 29 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, HAL povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/240 °C	59
Obr. 30 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, HAL povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/250 °C	59
Obr 31 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, ENIG povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/230 °C	60
Obr. 32. výbrus, Sn99,3Cu0,7, ENIG povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/240 °C.....	60

Obr. 33 - výbrus, Sn99,3Cu0,7, ENIG povrchová úprava – parametry nastavení pece: 195/215/250 °C.....	60
Obr. 34 – měřicí přístroj teploty	72
Obr. 35 – detail testovacího vzorku uchycení v čelisti.....	72
Obr. 36 – namáhání čelisti na součástku	73
Obr. 37 - termomechanické namáhání.....	73
Obr. 38 - testované součástky a DPS, povrchová úprava - Cu	74
Obr. 39 - testované součástky a DPS, povrchová úprava –HAL.....	74
Obr. 40 - testované součástky a DPS, povrchová úprava –ENIG	74
Obr. 41 - optická analýza výbrusu pod mikroskopem.....	75
Obr. 42 – mikroskop a obrazová analýza	75
Obr. 43 – detail na testovací sestavu při termomechanické zkoušce.....	75

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Příklad pájecích slitin a jejich Intermetalické sloučeniny	34
Tabulka 2- Specifikace přetavovací pece Mistral 260 [23]	42
Tabulka 3 - výsledné zprůměrované síly se směrodatnou odchylkou.....	53
Tabulka 4 – Pájecí slitina Sn48Bi52, povrchová úprava Cu, namáhání laboratorní teplotou a namáhání teplotou 65°C, teplotní profily: 110/130/145°C, 110/130/155°C, 110/130/165°C	70
Tabulka 5 - Pájecí slitina Sn48Bi52, povrchová úprava ENIG, namáhání laboratorní teplotou a namáhání teplotou 65°C, teplotní profily: 110/130/145°C, 110/130/155°C, 110/130/165°C	70
Tabulka 6 - Pájecí slitina Sn48Bi52, povrchová úprava HAL, namáhání laboratorní teplotou a namáhání teplotou 65°C, teplotní profily: 110/130/145°C, 110/130/155°C, 110/130/165°C	70
Tabulka 7 - Pájecí slitina Sn99,3Cu0,7, povrchová úprava Cu, namáhání laboratorní teplotou a namáhání teplotou 65°C teplotní profily: 195/215/230°C, 195/215/240°C, 195/215/250°C	71
Tabulka 8 - Pájecí slitina Sn99,3Cu0,7, povrchová úprava ENIG, namáhání laboratorní teplotou a namáhání teplotou 65°C, teplotní profily: 195/215/230°C, 195/215/240°C, 195/215/250°C	71
Tabulka 9 - Pájecí slitina Sn99,3Cu0,7, povrchová úprava HAL, namáhání laboratorní teplotou a namáhání teplotou 65°C, teplotní profily: 195/215/230°C, 195/215/240°C, 195/215/250°C	71

Seznam grafů

Graf 1 –teplotní profil sedlového typu [17]	25
Graf 2 – teplotní profil lineárního typu [17]	26
Graf 3 – závislost pevnosti spojů na tloušťce difúzní vrstvy [2]	32
Graf 4 - závislost tloušťky růstu intermetalické vrstvy na čase pro různé teploty [2]	33
Graf 5 - příklad přetavovacího profilu s vyznačenou oblastí „heating factor“ [5].....	36
Graf 6 - Závislost tloušťky IMC na velikosti $Q\eta$ [5]	37
Graf 7 - střední doba do poruchy na $Q\eta$ [5].....	38
Graf 8 - Střední doba poruchy na $Q\eta$ [8]	38
Graf 9 - teplotní profil pece mistral pro pájecí slitinu Sn42Bi58.....	44
Graf 10 - teplotní profil pece mistral pro pájecí slitinu Sn99,3Cu0,7.....	45
Graf 11 - časový průběh síly působící na dva vzorky.....	52

Seznam zkratk a symbolů

BGA (Ball Grid Array) – pouzdro integrovaného obvodu pro povrchovou montáž

DPS (deska plošného spoje)

PCB (printed circuit board)

FR4 (Flame resistant 4) – materiál desky plošného spoje

SMD (Surface mount device) – součástka pro povrchovou montáž plošného spoje

SMT (Surface mount technology) – typ povrchové montáže desky plošných spojů

THT (Through – hole technology) - typ vsazové montáže desky plošných spojů

ENIG (Electroless nickel immersion gold) – typ povrchové úpravy zahrnující nanesení niklu a zlata

HAL (hot air leveling) – typ povrchové úpravy zahrnující vyfoukání cínu

IMC (Intermetallic compound) – intermetalická sloučenina

Přílohy

Tabulka 4 – Pájecí slitina Sn48Bi52, povrchová úprava Cu, namáhání laboratorní teplotou a namáhání teplotou 65°C, teplotní profily: 110/130/145°C, 110/130/155°C, 110/130/165°C

110-130-145_cu		110-130-145_cu65		110-130-155_cu		110-130-155_cu65		110-130-165_cu		110-130-165_cu65	
vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]
1	46,78	1	44,28	1	60,92	1	51,68	1	57,92	1	52,81
2	55,71	2	52,48	2	52,84	2	51,14	2	64,54	2	68,43
3	58,50	3	73,67	3	57,18	3	56,07	3	72,62	3	50,19
4	71,27	4	68,32	4	66,83	4	64,81	4	79,22	4	60,86
5	69,69	5	52,98	5	76,20	5	76,11	5	74,06	5	57,37
6	53,61	6	51,53	6	68,47	6	62,39	6	72,88	6	63,51
7	58,06	7	67,68	7	63,17	7	48,84	7	62,55	7	48,40

Tabulka 5 - Pájecí slitina Sn48Bi52, povrchová úprava ENIG, namáhání laboratorní teplotou a namáhání teplotou 65°C, teplotní profily: 110/130/145°C, 110/130/155°C, 110/130/165°C

110-130-145_au		110-130-145_au65		110-130-155_au		110-130-155_au65		110-130-165_au		110-130-165_au65	
vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]
1	47,01	1	49,33	1	72,99	1	50,39	1	76,40	1	50,83
2	45,68	2	52,68	2	55,92	2	55,47	2	65,08	2	52,02
3	52,04	3	81,90	3	45,15	3	79,35	3	78,46	3	56,39
4	53,79	4	67,11	4	75,53	4	62,64	4	64,02	4	61,07
5	51,72	5	72,77	5	65,85	5	61,92	5	85,88	5	67,60
6	51,22	6	59,99	6	46,23	6	73,63	6	74,07	6	44,09
7	50,75	7	45,86	7	49,24	7	43,59	7	100,64	7	68,79

Tabulka 6 - Pájecí slitina Sn48Bi52, povrchová úprava HAL, namáhání laboratorní teplotou a namáhání teplotou 65°C, teplotní profily: 110/130/145°C, 110/130/155°C, 110/130/165°C

110-130-145_hal		110-130-145_hal65		110-130-155_hal		110-130-155_hal65		110-130-165_hal		110-130-165_hal65	
vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]
1	49,41	1	22,51	1	68,26	1	44,86	1	79,36	1	35,15
2	52,44	2	50,88	2	88,29	2	48,61	2	49,53	2	41,60
3	46,50	3	51,60	3	85,21	3	52,40	3	52,26	3	42,18
4	50,65	4	55,61	4	63,67	4	55,49	4	68,39	4	43,32
5	54,83	5	24,09	5	85,86	5	60,57	5	55,26	5	44,15
6	45,35	6	45,16	6	62,75	6	59,44	6	57,35	6	45,38
7	22,51	7	40,66	7	68,13	7	61,70	7	64,28	7	0,00

Tabulka 7 - Pájecí slitina Sn99,3Cu0,7, povrchová úprava Cu, namáhání laboratorní teplotou a namáhání teplotou 65°C teplotní profily: 195/215/230°C, 195/215/240°C, 195/215/250°C

195-215-230_cu		195-215-230_cu_65		195-215-240_cu		195-215-240_cu_65		195-215-250_cu		195-215-250_cu_65	
vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]
1	43,43	1	50,50	1	52,50	1	45,98	1	47,42	1	16,01
2	50,64	2	36,83	2	43,31	2	44,36	2	53,14	2	42,49
3	59,70	3	49,77	3	49,50	3	48,72	3	59,74	3	43,17
4	53,35	4	42,91	4	44,01	4	56,23	4	48,08	4	44,85
5	45,74	5	45,80	5	50,38	5	57,41	5	42,92	5	40,94
6	45,96	6	53,97	6	50,74	6	64,10	6	51,48	6	42,36
7	42,57	7	50,79	7	55,47	7	41,41	7	65,87	7	40,86

Tabulka 8 - Pájecí slitina Sn99,3Cu0,7, povrchová úprava ENIG, namáhání laboratorní teplotou a namáhání teplotou 65°C, teplotní profily: 195/215/230°C, 195/215/240°C, 195/215/250°C

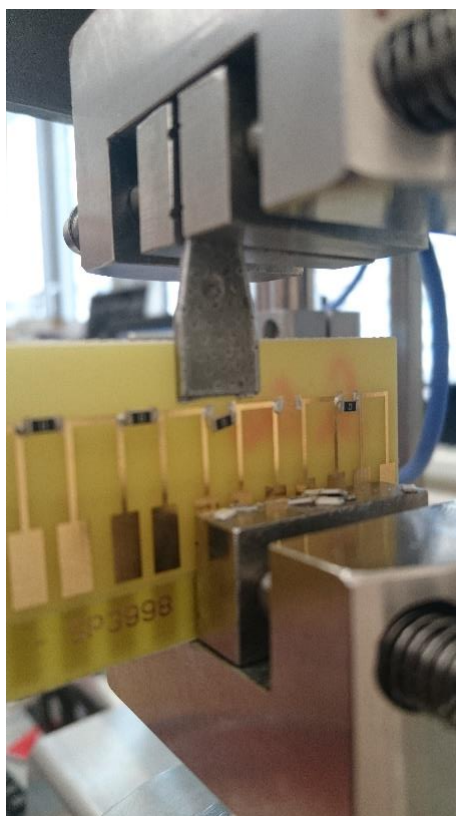
195-215-230_au		195-215-230_au_65		195-215-240_au		195-215-240_au_65		195-215-250_au		195-215-250_au_65	
vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]
1	47,19	1	51,08	1	46,44	1	53,52	1	50,37	1	60,77
2	35,77	2	57,00	2	51,13	2	48,98	2	42,97	2	41,93
3	46,80	3	61,04	3	48,34	3	55,24	3	51,14	3	52,20
4	48,98	4	50,08	4	46,64	4	60,95	4	45,66	4	58,60
5	45,92	5	50,63	5	57,99	5	50,49	5	53,36	5	57,26
6	44,81	6	49,57	6	57,92	6	62,56	6	51,17	6	53,64
7	59,94	7	50,12	7	54,34	7	38,24	7	52,14	7	46,53

Tabulka 9 - Pájecí slitina Sn99,3Cu0,7, povrchová úprava HAL, namáhání laboratorní teplotou a namáhání teplotou 65°C, teplotní profily: 195/215/230°C, 195/215/240°C, 195/215/250°C

195-215-230_Hal		195-215-230_Hal_65		195-215-240_au		195-215-240_Hal_65		195-215-250_Hal		195-215-250_Hal_65	
vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]	vzorek č.	F _{max} [N]
1	55,99	1	37,13	1	55,40	1	52,40	1	41,37	1	46,98
2	46,37	2	34,66	2	46,51	2	52,37	2	48,86	2	33,77
3	49,35	3	46,97	3	52,87	3	53,97	3	46,77	3	51,42
4	50,62	4	45,48	4	44,47	4	53,29	4	44,78	4	52,80
5	49,76	5	45,64	5	48,06	5	49,52	5	45,98	5	51,42
6	62,12	6	39,95	6	42,62	6	44,48	6	48,82	6	51,39
7	45,33	7	44,60	7	54,65	7	51,94	7	50,81	7	38,08



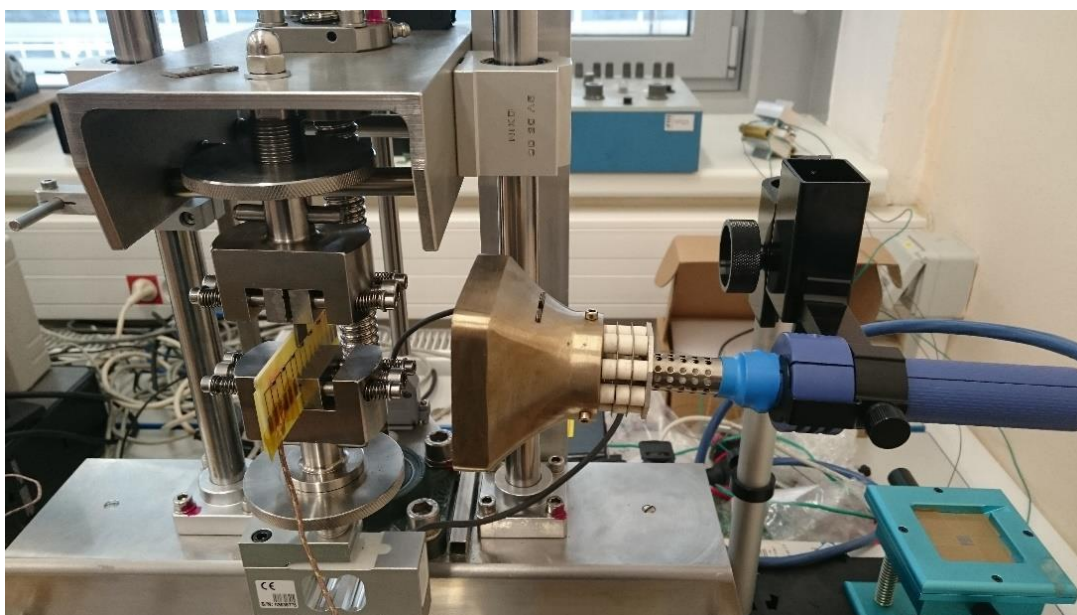
Obr. 34 – měřicí přístroj teploty



Obr. 35 – detail testovacího vzorku uchycení v čelisti



Obr. 36 – namáhání čelisti na součástku



Obr. 37 - termomechanické namáhání



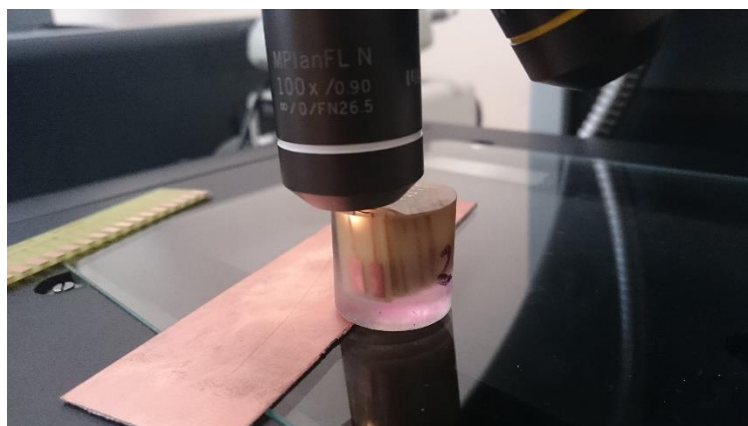
Obr. 38 - testované součástky a DPS, povrchová úprava - Cu



Obr. 39 - testované součástky a DPS, povrchová úprava –HAL



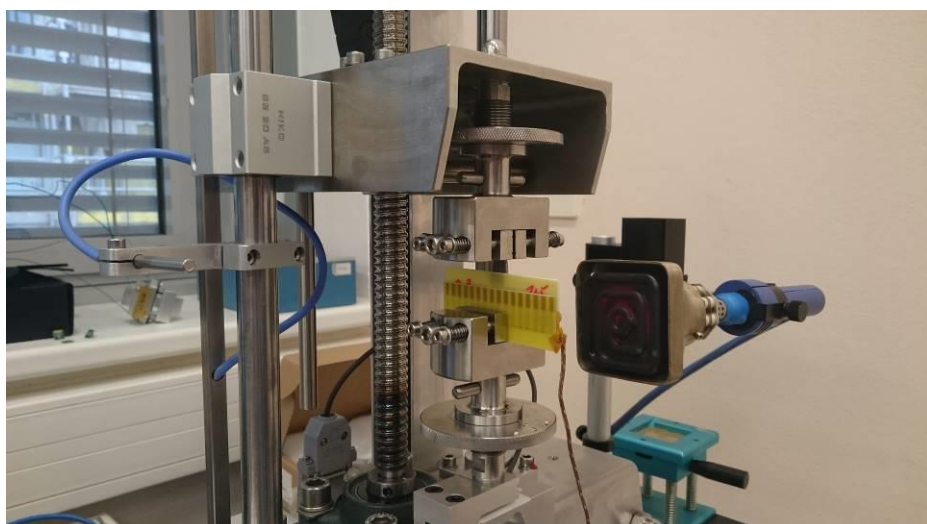
Obr. 40 - testované součástky a DPS, povrchová úprava –ENIG



Obr. 41 - optická analýza výbrusu pod mikroskopem



Obr. 42 – mikroskop a obrazová analýza



Obr. 43 – detail na testovací sestavu při termomechanické zkoušce