

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Vliv nastavení pájecí pece na kvalitu pájených spojů

Solder joints quality evaluation based on soldering
oven settings

Angelika Staňková

Vedoucí práce: Ing. Petr Veselý

Obor: Elektrotechnika a management

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Staňková** Jméno: **Angelika** Osobní číslo: **422718**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv nastavení pájecí pece na kvalitu pájených spojů

Název bakalářské práce anglicky:

Solder joints quality evaluation based on soldering oven settings

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši na tématiku pájení přetavením – používané slitiny, tavidla, technologie, metody hodnocení kvality.
2. Navrhněte experimentální postup ověření vlivu nastavení pájecí pece na kvalitu pájených spojů a experiment proveďte pro soubor vzorků s nízkotavitelnou pájecí slitinou.
3. Výsledky experimentální části vyhodnoťte.
4. Proveďte ekonomické zhodnocení využití bezolovnatých nízkotavitelných pájecích past.

Seznam doporučené literatury:

- [1] PIETRIKOVÁ, Alena, ĎURIŠIN, Juraj a MACH, Pavel. Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike. 1. vyd. Košice : Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [2] MACH, Pavel, SKOČIL, Vlastimil a URBÁNEK, Jan. Montáž v elektronice: pouzdrění aktivních součástek, plošné spoje. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [3] PUTTLITZ, K. J., STALTER, K. A. Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies. CRC Press, 2004. ISBN 978-0824748708

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Veselý, katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **24.01.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Petr Veselý
podpis vedoucí(ho) práce

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studentky

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Petru Veselému za pomoc, cenné rady, neskutečnou trpělivost, vedení a přátelský přístup.

Dále chci poděkovat celému týmu katedry elektrotechnologie, že mi vyšli vstříc se všemi mými požadavky a umožnili tak vznik této práce. Nebylo to se mnou vždy jednoduché.

Největší dík patří mým milujícím rodičům za podporu a umožnění bakalářského studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

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 1.5.2019,

Angelika Staňková

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje tématu pájení přetavením a vlivu nastavení pájecí pece na kvalitu pájeného spoje.

V první části jsem rozebrala používané technologie, slitiny, tavidla a metody používané k hodnocení kvality spoje.

V druhé části jsem navrhla experiment, kterým jsem se snažila ověřit svou hypotézu o tom, že nastavení pece se nedá reprezentovat pouze heating factorem, protože záleží jakým způsobem byl heating factor vytvořen. K tomu jsem využila ekvivalentní heating factory, pro které jsem hodnotila růst intermetalické vrstvy a tím ovlivněné mechanické a elektrické vlastnosti.

Další část shrnuje výsledky mých dvou experimentů. V jednom jsem změnila celý teplotní profil, včetně předehřevu a v druhém jsem ovlivňovala pouze oblast přetavení. Vyhodnotila jsem všechny naměřené hodnoty a z nich vyvodila závěry.

Na závěr jsem provedla ekonomické zhodnocení využití bezolovnatých nízkotavitelných pájecích past a jejich výhod či nevýhod oproti klasické bezolovnaté pájecí pastě.

Klíčová slova: Pájení přetavením, Heating faktor, SMT, SMD, šablonový tisk, bezolovnatá nízkotavitelná pájecí pasta, IMC vrstva

Vedoucí práce: Ing. Petr Veselý

Abstract

In this Bachelor Thesis, I focused on the topic of reflow soldering and the influence of the oven settings on the solder joint quality.

In the first part, I described used technologies, alloys, fluxes and methods of quality assessment (evaluation) of solder joints.

In the second part, I designed an experiment in order to verify my hypothesis that the oven settings cannot be represented only by a heating factor, because it depends on the way how the heating factor was created. I used temperature profiles with an equivalent heating factor and I evaluated the growth of the intermetallic layers and the mechanical and electrical properties affected by it.

In the next part I summarized the results of my two experiments. In the first experiment, I was changing the entire temperature profile including the preheat phase. In the second experiment, I was influencing only the reflow phase. I evaluated all the measured values and then I made conclusions from them.

In the last part, I performed an economic evaluation of nowadays used lead-free, low-melting solder pastes and I presented their benefits or disadvantages compared to the conventional lead-free solder pastes.

Keywords: Reflow soldering, Heating factor, SMT, SMD, Stencil printing, low-temperature solder paste, IMC creation

Title translation: Solder joints quality evaluation based on soldering oven settings

Obsah

1 Úvod	1	5 Ekonomické zhodnocení bezolovnatých past	51
2 Rešerše na tematiku pájení přetavením	3	5.1 Náklady na energie	52
2.1 Pájení přetavením	3	5.1.1 Spotřeba pájecí pece	52
2.1.1 Pájení ohřevem infračervenými zářiči	4	5.1.2 Cena a spotřeba elektrické energie	52
2.1.2 Pájení laserem	5	5.2 Náklady na materiál (pastu)	55
2.1.3 Ohřev vedením tepla	6	5.3 Zmetkovitost	56
2.1.4 Ohřev horkým plynem	6	5.4 Celkové provozní náklady	57
2.1.5 Ohřev kondenzací nasycených par (pájení v parách)	7	5.5 Citlivostní analýza	59
2.2 Teplotní profil	9	5.6 Zhodnocení ekonomické části	63
2.2.1 Heating factor	11	6 Závěr	65
2.3 Pájecí pasty	12	A Literatura	69
2.4 Používané slitiny	13		
2.5 Tavidla	15		
2.6 Intermetalická vrstva	17		
2.6.1 Intermetalické sloučeniny na rozhraní Sn-Cu	19		
2.7 Metody hodnocení kvality pájeného spoje	20		
2.7.1 Měření přechodového odporu spoje	20		
2.7.2 Metalografický výbrus příčného spoje	21		
2.7.3 Mechanická zkouška tahem	27		
3 Návrh experimentu	29		
3.1 Použité pasty, počet a typy vzorků	29		
3.2 Zvolené teplotní profily	32		
3.3 Čtyřbodová metoda	35		
3.4 Zkouška tahem	36		
3.5 Analýza elektronovým mikroskopem	37		
4 Vyhodnocení experimentu	39		
4.1 Vyhodnocení čtyřbodové metody	39		
4.2 Vyhodnocení zkoušky tahem	41		
4.3 Vyhodnocení analýzy elektronovým mikroskopem	43		

Kapitola 1

Úvod

V dnešní době se klade velký důraz na ekologickou stránku věci, což se promítlo i do elektrotechniky a elektroniky. Hledají se nové možnosti využití ekologičtějších materiálů nejenom při výrobě součástek, ale i při jejich spojování.

Prvním krokem bylo vyřazení olovnatých pájek, které se dnes až na výjimky při pájení nesmějí používat. Což přineslo značné problémy, neboť ekologické bezolovnaté pájky nedosahovaly takových vlastností jako pájky olovnaté, například nedosahují takové smáčivosti, což vede k používání agresivnějších tavidel a jejich následnému nucenému odstranění z DPS (desky plošného spoje) [1].

Vlivem toho, že bezolovnaté pájky obsahují minimálně 60 % Sn a zbytek je doplňován většinou drahými kovy, je jejich cena oproti klasické SnPb pájce mnohonásobně vyšší.

Další problém nastává, že pokud se nejedná o pájku s nízkým bodem tavení (např. SnBi, SnBiAg), mají bezolovnaté pájky bod tavení až při teplotě v rozmezí 195-225°C. Takto vysoké teploty mohou způsobit poškození pájených součástek. Olovnaté pájky dosahují tekutého stavu již kolem teploty 180°C [2].

To samozřejmě vedlo k tomu, že se vynaložilo velké úsilí na zlepšení vlastností bezolovnatých pájek a ke zkoumání jejich vlivu na kvalitu pájeného spoje.

V této bakalářské práci budeme zkoumat vliv nastavení teplotního profilu pece, reprezentovaného heating factorem (kombinovaný faktor teploty a času nad teplotou tání slitiny), na kvalitu pájeného spoje tvořeného bezolovnatou pájecí pastou s nízkým bodem tání. V dnešní době se má za to, že pokud máme

1. Úvod

ekvivalentní heating factor, který ale mohl vzniknout za různých podmínek, bude kvalita pájeného spoje stejná. Toto jsem se snažila v mé práci potvrdit či vyvrátit.[3]

Kapitola 2

Rešerše na tematiku pájení přetavením

2.1 Pájení přetavením

Technologie pájení přetavením (Reflow soldering) je dnes nejvýznamnější metodou pájení u technologie povrchové montáže (Surface mount technology, zkráceně SMT). Pájení přetavením umožňuje velmi husté osazení (narozdíl od pájení vlnou omezuje tvorbu můstků mezi sousedními spoji) součástek a použití takových součástek, které se nemohou použít při pájení tekutou pájkou [2].

Princip této techniky spočívá v nanesení pájky ve formě pájecí pasty na místa, která mají být spájena, ještě před samotným pájením. Nanesení pájecí pasty se provádí stejně jako nanesení tlustých vrstev, sítotiskem, šablonovým tiskem nebo dispenserem (vytlačování příslušného objemu pájecí pasty dutým hrotem) [4].

Po nanesení pasty na pájecí plošky (pady) se provede osazení desky plošného spoje (DPS) SMD (Surface mount device) součástkami.

Před vlastním zatavením je nutné provést sušení pasty, při kterém dochází k odpaření kapalných složek pájecí pasty, mění se její viskozita, zabraňuje se přístupu vlhkosti z okolního prostředí a aktivuje se tavidlo, které je součástí pájecí pasty [1].

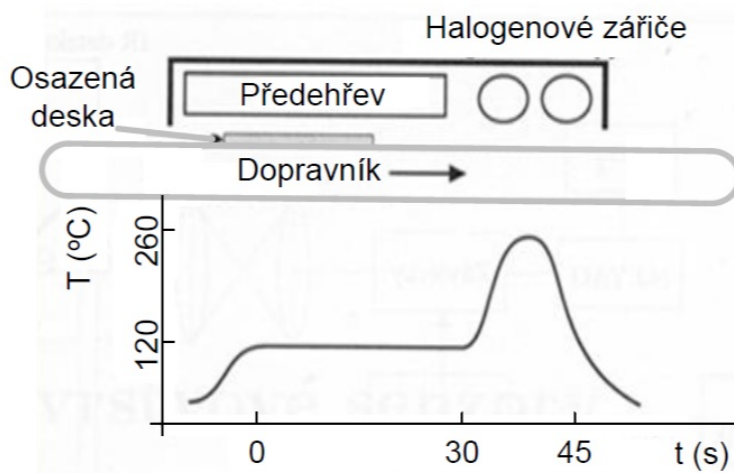
Aktivací tavidla dojde k redukci oxidů na povrchu pájeného spoje a jeho čištění. Proces aktivace tavidla nejčastěji probíhá při postupném zvyšování teploty do 80 - 150 °C v závislosti na složení pájecí pasty [1][2].

V případě nedokonalého sušení pájecí pasty se v procesu přetavení prudce

Zařízení pro IČ přetavení obvykle zahrnuje tři vyhřívací pásma potřebné pro sušení pasty, aktivaci tavidla a přetavení pájky. Technologické zařízení pro IČ pájení přetavením se využívají i na předohřev a vytvrzování lepidel při jiných metodách pájení.

Princip přetavovacích pecí s dopravníkovým pásem (viz obrázek 2.1):

- DPS prochází přes oddělené zóny ohřevu.
- Teplota jednotlivých zón ohřevu může být kontrolována samostatně.
- Teplotní profil jednotlivých zón přetavení je daný teplotou jednotlivých zón ohřevu a rychlostí dopravníku.



Obrázek 2.1: Princip IČ přetavovacích pecí s dopravníkovým pásem [4].

2.1.2 Pájení laserem

Další metodou pájení přetavením je za pomoci použití laseru. Laser představuje rovnoběžný svazek koherentního monochromatického světla, který se dá velmi dobře opticky zpracovat. Opět při dopadu záření na povrch pájeného místa dochází k jeho odrazu, rozptylu a absorpci. Absorbované záření způsobí ohřátí materiálu a následné přetavení pájecí pasty. Přestože je vytvoření pájeného spoje rychlé, přesné a nezpůsobuje velké tepelné zatížení součástek, osazení celé DPS by bylo ekonomicky neefektivní. Může se využívat u složitých aplikací, kde se klade velký důraz na kvalitu pájeného spoje [4].

■ 2.1.3 Ohřev vedením tepla

Pájení vedením tepla představuje známý způsob pájení v oblasti technologie výroby hybridních integrovaných obvodů a nekonvenčních aplikací na keramických podložkách. Vyhřívavý dopravníkový pás nese osazené DPS a prochází dvěmi nahřátými zónami: předohřevem a přetavením. Při předehřevu dochází k odpaření rozpouštědel a aktivátorů z tavidla. Průchod zónou předohřevu je důležitý pro zamezení tvorby vzniku bublinek a jiných nežádoucích efektů při tvorbě pájeného spoje. Vlastní přetavení probíhá při dosažení teploty tavení pájené slitiny. Tento druh pájení se již příliš nevyužívá, protože je velmi závislý na kontaktu DPS s vyhřívacím pásem. Navíc je tato metoda vhodná jen pro malé a jednostranně osazené DPS, čímž se značně eliminují výhody SMT [2][4].

■ 2.1.4 Ohřev horkým plynem

Zařízení pro pájení horkým plynem (vzduch, dusík) byla vyvinuta pro malou výrobu, výrobu prototypů v laboratorních podmínkách a pro výměnu chybných součástek povrchové montáže. Systém zahrnuje generátor horkého plynu s extrémně krátkým náběhem požadované teploty, přičemž teploty plynu je o desítky stupňů vyšší než teplota přetavení pájecí pasty. Vzdálenost trysky od pájeného místa a profil proudícího plynu závisí na typu součástky a tvaru trysky. Systémy mohou být doplněny stereomikroskopem a vakuovou pinzetou, zařízením na přesné ruční umístění součástek, které jsou potřebné pro výměnu chybných součástek [4].



Obrázek 2.2: Pohled na horkovzdušnou pec Mistral 260 [5].



Obrázek 2.3: Tři vyhřívací pásma horkovzdušné pece [6].

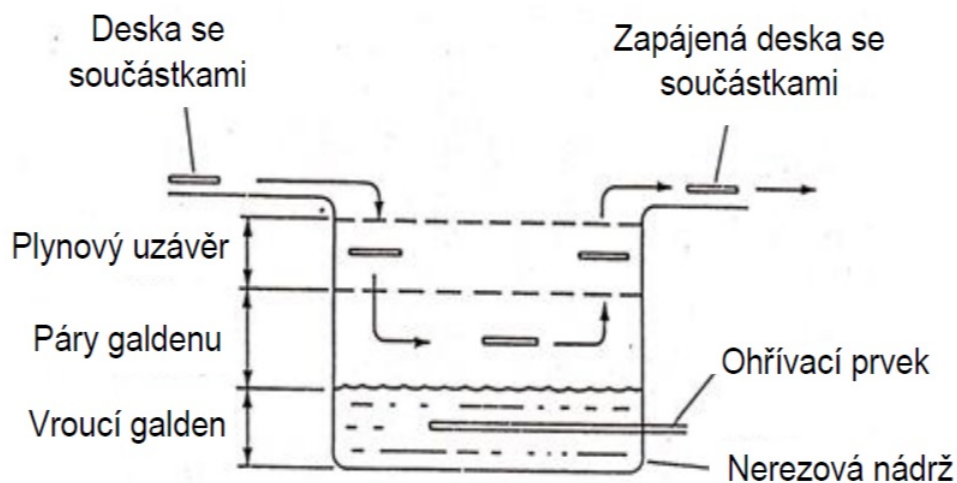
Pece s dopravníkovým pásem s ohřevem na principu proudění plynu mají 3 až 12 zón ohřevu. V prvních zónách dochází k předohřevu. Postupně narůstá teplota v peci v jednotlivých zónách a dochází k jejímu sladění s profilem přetavení, který dodává výrobce pájecí pasty. Po přechodu zóny přetavení dochází k ochlazování. Větší počet zón dává možnost pro citlivější regulaci teploty a tím pádem i pro přesnější dodržení teplotního profilu. V dnešní době je to jedna z nejrozšířenějších technologií pro hromadné pájení [1][2].

■ 2.1.5 Ohřev kondenzací nasycených par (pájení v parách)

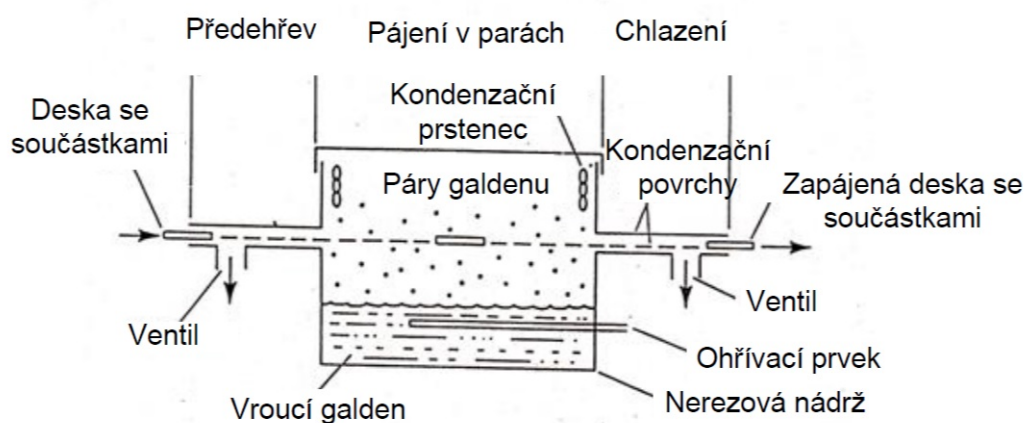
Při tomto procesu je DPS osazená součástkami ohřívána kondenzačním teplem pracovní kapaliny. Nanese se pájecí pastu na DPS, osadí se součástkami a vloží se do zařízení pro pájení v parách. V zařízení se využívají kapaliny s vysokou stabilitou v širokém rozsahu teplot, které nejsou chemicky agresivní. Tyto kapaliny mají teplotu varu nad teplotou tání slitiny, například galden s teplotou varu 230 °C. Desky se umísťují do prostoru, kde se nachází pára pracovní kapaliny, která poté zkondenzuje na DPS a předané kondenzační teplo způsobí přetavení spoje. Zkondenzovaná kapalina je odváděna do dolní části pájecího zařízení a znovu použita [4].

Pájení v parách se provádí v dávkách, nebo kontinuálně. Zařízení pro tuto pájení vidíme na obrázcích (obrázek 2.4, 2.5). Hlavním přínosem této technologie je rovnoměrné rozložení ohřevu DPS oproti ohřevu IČ zářením.

2. Rešerše na tematiku pájení přetavením



Obrázek 2.4: Zařízení pro pájení v parách (v dávkách) [4].



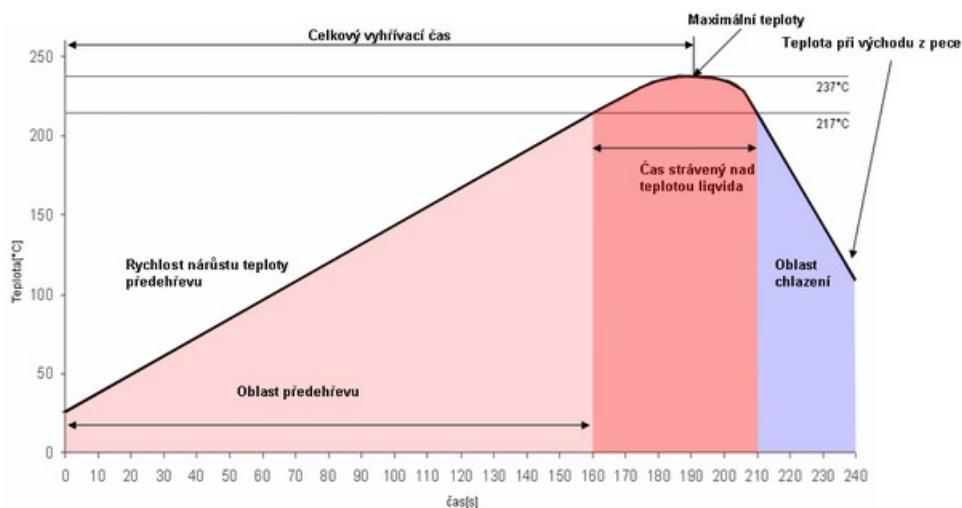
Obrázek 2.5: Zařízení pro pájení v parách (kontinuální) [4].

2.2 Teplotní profil

Teplotní profil pájecího procesu je závislost teploty pájení na čase. Správně zvolený teplotní profil je hlavním předpokladem pro správné zapájení součástek bez defektu [7].

Teplotní profil pro jednotlivé pájecí pasty vždy dodává výrobce na základě testování dané pájecí pasty. Vybraný teplotní profil musí přitom respektovat maximální teplotu, kterou snesou osazené součástky, teplotu tavení použité pájky a teplotní profil tavidla (aby došlo k jeho aktivaci), případně další faktory [7].

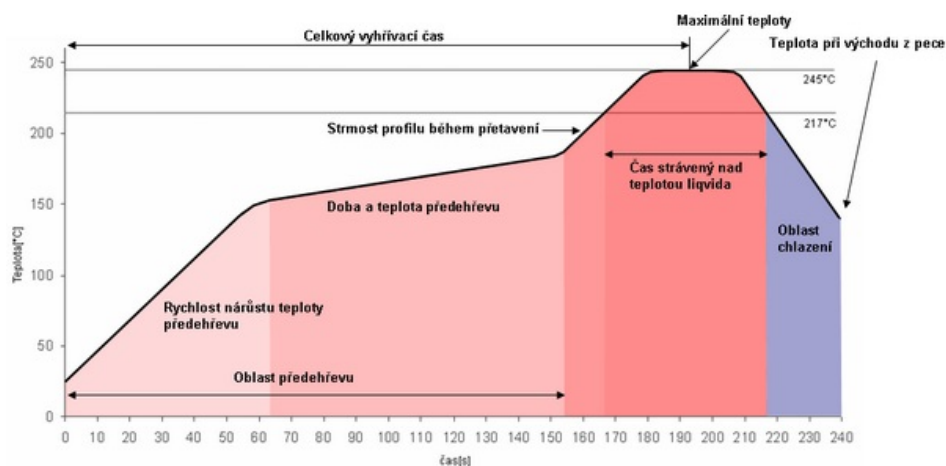
Teplotní profil může mít lineární průběh, tj. lineárně narůstá až do maximální teploty. Označuje se jako RTS (Ramp to Spike), viz obrázek 2.6 [8].



Obrázek 2.6: Lineární teplotní profil [8].

Takovéhoto profilu se však v praxi obtížně dosahuje. Typičtější pro průběžné pece s několika zónami o různých teplotách je tzv. sedlový profil. Označován také jako RSS (Ramp Soak Spike), viz obrázek 2.7 [8][7].

2. Rešerše na tematiku pájení přetavením



Obrázek 2.7: Sedlový teplotní profil [8].

Měření teplotního profilu je nedílnou součástí určování podmínek přetavení. Při měření se zpravidla používají termočlánky připojeny na datalogger, které je odolné vůči vysokým teplotám. To spolu s testovanou DPS prochází přednastavenou pecí. Důležitou částí při měření teplotního profilu u pecí s dopravníkovým pásem je správné umístění termočlánku. Termočlánky by měly být umístěny na testovací DPS na místa, kde se očekává nejvyšší nebo nejnižší teplota. Takto získané průběhy teplotního profilu určují, kde se nachází závislost teploty na čase pro ostatní spoje na DPS. Termočlánek by se měl také připojit do rohu součástky a co nejblíže středu. Navíc by měla být monitorována teplota samotné součástky aby se předešlo přílišnému přehřátí a poškození součástky [2].

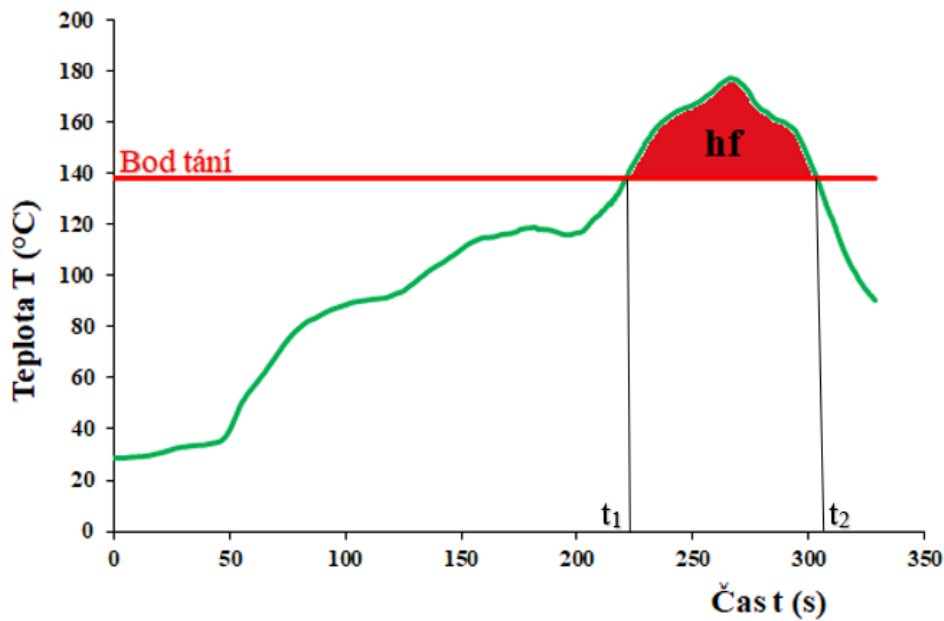
Pro nastavení teplotního profilu pece s dopravníkovým pásem se využívá profilometr (u nás konkrétně typ KIC2000), který obsahuje modul pro sběr dat, termočlánky a ochranný termoizolační obal [9].

Teplota 250 °C se nejčastěji doporučuje jako maximální teplota pro všechny pájené spoje na DPS. Při překročení této teploty může dojít k poškození DPS. Součástky jsou nejčastěji klasifikovány pomocí normy J-STD-020C, v závislosti na jejich pouzdře a objemu. Pro větší součástky může být maximální snesitelná teplota nižší než 250 °C [2].

Rychlý nárůst teploty může způsobit špatné smáčení a tvorbu kuliček pájky v okolí pájeného spoje, popřípadě defekty na součástkách. Naopak při prudkém ochlazení dochází k potlačení růstu intermetalických sloučenin v objemu pájky a může způsobit praskání spojů [1].

2.2.1 Heating factor

Integrál teploty a času pájení, tzv. heating factor, je obsah plochy pod křivkou teplotního profilu, omezený teplotou tání pájky (viz obrázek 2.8).



Obrázek 2.8: Heating factor pro zvolený teplotní profil.

Heating factor lze chápat jako množství tepla, které pájka přijme za bodem tání. Používá se k vyjádření kombinovaného vlivu teploty a času pájení nad bodem přetavení a reprezentuje zvolený teplotní profil.

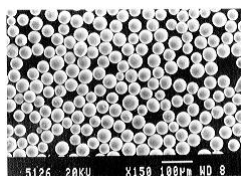
V dnešní době se předpokládá, že pro ekvivalentní heating factory by kvalita pájeného spoje měla být stejná. Což znamená, že by intermetalická (IMC) vrstva, která ovlivňuje jeho elektrické a mechanické vlastnosti, měla narůstat obdobně a přechodový odpor a stříhová síla by neměly být rozdílné [3]. Matematicky heating factor definujeme jako:

$$Q_{\eta} = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_m) dt \quad [s \cdot K], \quad (2.1)$$

kde T_m [K] je teplota bodu tání pájecí pasty, T [K] je měřená teplota, t_1 [s] je čas kdy $T \geq T_m$ a t_2 [s] je čas $T \leq T_m$ (viz obrázek 2.8) [10].

2.3 Pájecí pasty

Pájecí pasta se používá při pájení přetavením u SMT. Skládá se z homogenní směsi prášku pájecí slitiny s průměrem zrn 5-160 μm , tavidla a dalších přísad potřebných ke správné viskozitě, roztékání a lepivosti směsi. Lepivost je důležitá pro fixování součástky před samotným přetavením. Tavidlo a ostatní příměsy tvoří cca. 11 % pájecí pasty [2].



Obrázek 2.9: Ilustrační foto zrn slitiny vyskytujících se v pájecí pastě [13].

Pájecí pasta se vyrábí smícháním tavidla a kovového prášku. Snahou výrobce je, aby se podíl kovu co nejvíce přiblížil vlastnostem olovnaté pájecí pasty, tj. aby byl podíl kovu v pastě 90 % při hustotě tavidla 1 g/ml [2].

Složení kovového prášku pájecí pasty pro pájení přetavením je nejčastěji na bázi slitiny SnAgCu. Při výrobě zrn pájky se dbá na dodržení vyhovující velikosti a je snaha, aby zrna byla všechna stejná, protože nepravidelný tvar způsobuje problémy při aplikaci pasty. Navíc se s velikostí zrn mění i množství oxidů na povrchu, což má nežádoucí vliv na pájení a výslednou kvalitu pájeného spoje. Proto se v závislosti na velikosti zrn mění i složení tavidla v pájecí pastě [2].

Na kvalitu pájení má rozhodující vliv složení pasty, způsob a přesnost jejího nanášení na DPS. Například pro síťotisk jsou vhodné pasty s kulovými nebo oválnými částicemi a podílem kovových částic 85-95 % [1].

Vlivy vnějších technologických činitelů na vlastnosti pájecí pasty:

- Vlhkost
- Nadměrná teplota
- Podmínky tisku
- Příprava pájecí pasty: aklimatizace a přemístění

- Nanášení pájecí pasty na šablonu
- Skladování nádob s otevřenou pájecí pastou

Způsoby aplikování pájecí pasty na DPS:

- Protlačením přes sítku - sítotisk
- Protlačením přes šablonu - šablonový tisk
- Injekčně nebo dávkováním - za použití vysokého tlaku

2.4 Používané slitiny

Mezi základní vlastnosti, které se požadují při výrobě pájecích slitin, patří nízká teplota tání, smáčivost, mechanická integrita, dobrá spracovatelnost, přijatelná cena a v neposlední řadě se klade důraz na ekologickou nenáročnost [2].

Pájecí slitiny můžeme dělit na:

- olovnaté
- bezolvnaté

Nejčastěji se u olovnatých pájek používají takzvané eutektické slitiny s poměrem Sn63Pb37 nebo Sn60Pb40 s teplotou tání okolo 183 °C. Přidáním dalších kovů do slitiny nebo změnou poměru cínu a olova můžeme ovlivňovat vlastnosti, zejména bod tání slitiny, smáčivost a tvrdost spoje. Tím můžeme pájku přizpůsobit materiálu nebo technologii pájení, např. slitina Sn60Pb38Cu2 je hojně využívána k ručnímu pájení [1] [11].

Sn63Pb37 je pro nízkou teplotu tání vhodná v elektroprůmyslu do mnoha aplikací, kde je potřeba co nejnižší teplota při pájení a zároveň se klade důraz na mechanickou odolnost a velmi dobrou elektrickou vodivost. Spájené spoje mají dlouhou životnost. Tyto pájky se mohou stále používat do aplikací pro armádu či zdravotnictví a vesmírný program, bez ohledu na ekologická omezení [11].

Druhá skupina jsou bezolvnaté pájky, které vyhovují dnešní ekologické legislativě. K cínu jako základu bezolvnaté slitiny se nejčastěji přidává Ag, Cu, Zn, Sb a dnes už častěji i Ni [2].

2. Rešerše na tematiku pájení přetavením

V tabulce 2.1 vidíme prvky, které se využívají jako příměsi a jejich vliv na vlastnosti slitiny.

Stříbro	Ag	Stříbro sníží bod tavení, zajistí lepší smáčení a lepší pevnost spoje.
Měď	Cu	Zlepší pevnost spoje.
Zinek	Zn	Má nízkou teplotu tavení, zlevňuje slitinu.
Bismut	Bi	Sníží bod tavení, zajistí lepší smáčení.
Antimon	Sb	Zlepší pevnost spoje, sníží povrchové napětí, zlepšuje rozlévání a prevence nadzvedávání součástek.
Indium	In	Sníží bod tavení.
Nikl	Ni	Prevence odsmáčení.
Germanium	Ge	Prevence oxidace.

Tabulka 2.1: Prvky a jejich přidané vlastnosti do slitiny [11].

Nejrozšířenější bezolovnatou pájkou je v současné době typ SAC (tedy pájka s dominantním obsahem cínu a minoritním obsahem stříbra a mědi), např.: SAC305 (Sn96,5Ag3Cu0,5), SAC405 (Sn95,5Ag4Cu0,5), SAC 3575 (Sn95,8Ag3,5Cu0,75) a jiné. Její teplota tání se pohybuje okolo 217 °C až 220 °C. Tato pájka se nejčastěji využívá pro pájení vlnou a pro ruční pájení. Je sice dražší než olovnatá pájka, ale kvůli ekologickému omezení je hojně využívána. Stříbro snižuje bod tání a zajistí lepší smáčení. Spolu s mědí zlepšuje pevnost spoje. Tyto pájky nejsou vhodné pro povrchové úpravy součástek SnZn a SbPb. Ze skupiny binárních bezolovnatých pájek je to Sn99,3Cu0,7 s obsahem mědi 0,7 % a teplotou tání 227 °C. Bezolovnaté pájky mají většinou vyšší teplotu tavení, než pájky olovnaté, proto se využívají nízkotavitelné slitiny u kterých nehrozí poškození součástek vysokou teplotou v oblasti přetavení [1] [11] [12].

Jedním z dalších používaných substituentů olova v bezolovnatých pájkách je bismut. Tento prvek ve slitině s cínem výrazně snižuje bod tání a navíc má příznivou cenu. Pájka Sn42Bi58 dosahuje proto velmi nízkého bodu tání 138 °C až 141 °C a hodí se proto k pájení systémů citlivých na tepelné zatížení během pájení. Občas se do této pájky přidává ještě stříbro, které zlepšuje smáčivost a pevnost spoje [11].

2.5 Tavidla

Pro vytvoření pájeného spoje je nutné, aby povrchy dobře smáčely. Z toho vyplývá, že se musíme zbavit nečistot a oxidů na povrchu mědi. Tavidlo funguje jako redukční činidlo, které zbavuje povrch oxidů, ovlivňuje viskozitu a povrchové napětí pájky, tak že dochází k jejímu lepšímu roztékání [14].

Tavidlo obsahuje tyto čtyři základní složky:

- tavidlový nosič
- aktivátor
- aditivum
- rozpouštědlo

Základní nosnou látkou tavidla je tavidlový nosič. Aktivátory redukuje počet oxidů a nečistoty na povrchu. Aditiva upravují vlastnosti, jako je například viskozita tavidla. Jako rozpouštědlo se používá alkohol nebo deionizovaná voda [15].

Tavidla dělíme podle oplachu na [15]:

1. Oplachová: po pájení se musí odstranit, zanechávají agresivní zbytky poškozující pájený spoj (koroze). Obsahují organické kyseliny, tixotropní sloučeniny a rozpouštědla. Lze s nimi pájet i nejhorší povrchy. Zbytky je nutné odstranit za použití např. teplé vody (pak se jedná o tavidla typu WS - Water Soluable) nebo agresivnějších rozpouštědel (tzv. flux remover).
2. Bezoplachová, též NC (No-Clean): po pájení nezanechávají agresivní zbytky, naopak mohou dokonce spoj chránit před vlivem prostředí. Skládají se z pryskyřice, rozpouštědla a aktivátoru. Mají nízkou aktivitu. Vhodné pro lehce pájené povrchy. Zbytek tavidla může zůstat na povrchu DPS.

Podle složení:

1. Anorganická tavidla: vyskytují se ve formě past nebo roztoků, jsou vysoce korozivní. Existují ve formě solí, jako halogenové soli nebo soli bez halogenu.

Tavidla pro bezolovnaté pájky musí především zlepšovat jejich smáčivost, což je dáno vyšším povrchovým napětím těchto pájek. V porovnání s tavidlem pro olovnaté pájky musí vydržet vyšší teplotu ale nesmí se zvýšit množství výparů, což by vedlo k tvorbě chyb na spoji. Proto se pro bezolovnaté pájky používají především tavidla s vyšším podílem pevné složky. Ve výrobě se nejčastěji uplatňují tavidla rozpustná ve vodě. Zanechávají sice zbytky po pájení, ale obsahují velké množství aktivátorů, čímž zvyšují smáčivost povrchu a snižují oxidaci při procesu pájení. Po pájení je musíme odstranit [2] [16].

Jako nejvhodnější ekologické řešení pro bezolovnaté pájky se ukazují tavidla VOC-free (Volatile Organic Compounds-free - tavidla bez unikajících organických složek). Existují dva druhy: obsahující dikarbolické kyseliny kvůli nižší výparnosti nebo obsahující pryskyřici vázanou ve vodě. Oba dva typy jsou vhodné pro pájení přetavením při použití bezolovnaté pájecí pasty. Poskytují však horší smáčivost v porovnání s tavidly na bázi alkoholu, přidávají se do nich smáčivost podporující složky [2].

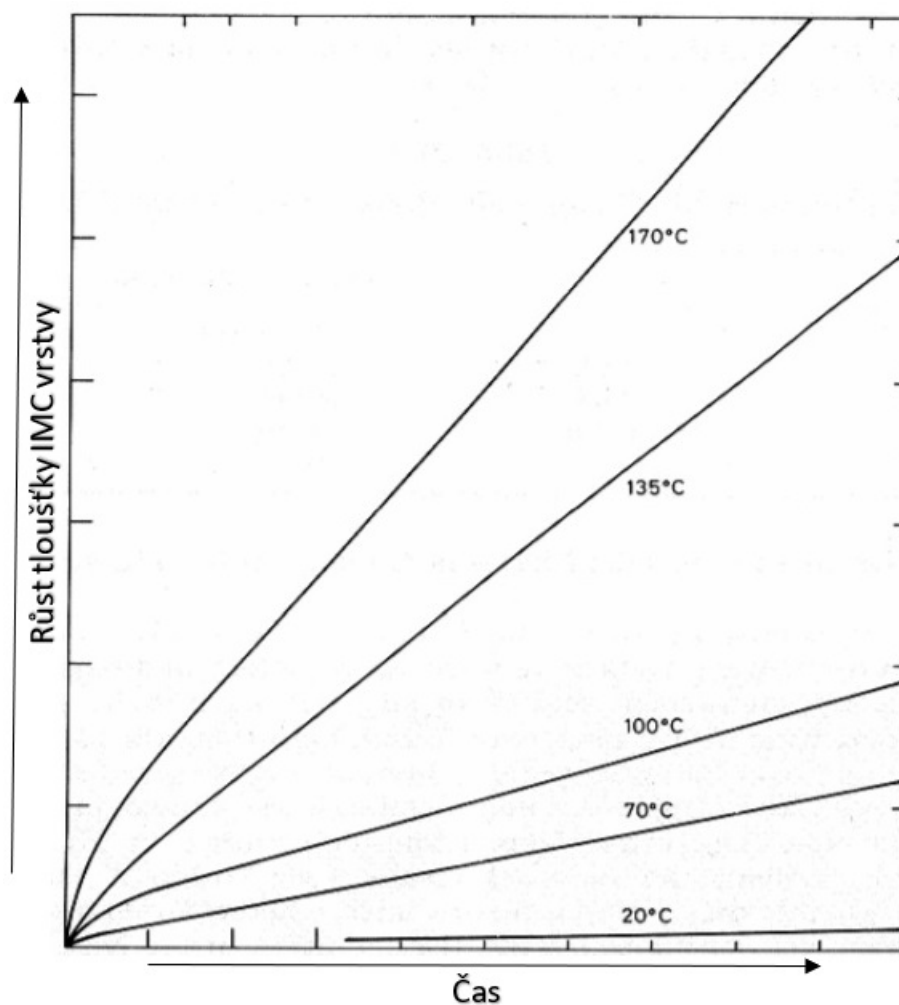
2.6 Intermetalická vrstva

Během pájení dochází k chemickým procesům, při nichž vznikají intermetalické sloučeniny (IMC) mezi pájkou a povrchem DPS. Tvoří se v důsledku rozdílu mezi Sn a ostatními kovy tvořícími pájený spoj, hlavně v oblasti nad bodem tání, tedy kdy je pájka v kapalném fázi.

Mezi intermetalické sloučeniny, které se vyskytují při pájení bezolovnatou pájkou, například patří Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , Ag_3Sn a Ni_3Sn_4 [2].

Jejich přítomnost je na jednu stranu nezbytná, protože vznikají během smáčecího procesu, čímž zajišťují větší pevnost vzniklého spoje. Na straně druhé mají intermetalické sloučeniny rozdílné uspořádání atomů v krystalické mřížce oproti základním kovům (Sn, Ag, Cu, Ni), proto tyto sloučeniny značně ovlivňují životnost a vlastnosti pájeného spoje, většinou se jedná o nežádoucí efekt. Mezi nežádoucí jevy patří vyšší rezistivita, větší křehkost pájeného spoje a menší teplotní vodivost [2][17][18].

Tloušťka IMC vrstev není konstantní, ale mění se s časem a teplotou, přičemž růst IMC můžeme pozorovat i při pokojové teplotě. S narůstající teplotou je růst IMC strmější (viz obrázek 2.9) [19].



Obrázek 2.10: Růst intermetalických vrstev v závislosti na čase při různých teplotách [18].

V případě, kdy je vrstva pájky velmi tenká, může IMC vrstva nahradit celou vrstvu pájky. Při optické analýze pájeného spoje může nastat problém, protože IMC vrstva má matně šedou barvu a může splývat s cínem obsaženým v pájce. IMC vrstvy mají vyšší bod tání a rozdílný součinitel delkové teplotní roztažnosti v porovnání s mědí a substrátem DPS, což může vést k mechanickému namáhání spoje při změně teploty [18].

2.6.1 Intermetalické sloučeniny na rozhraní Sn-Cu

Po smáčení se na povrchu mezi mědí a pájkou vytváří velmi rychle intermetalická sloučenina Cu_6Sn_5 o tloušťce několika stovek nanometrů. Vytvoření této vrstvy je nezbytnou součástí pro pevnou vazbu mezi kovem a pájkou. K tvorbě IMC vrstvy dochází i po vychladnutí a ztuhnutí pájky, tedy i pro teploty nižší než je bod přetavení. To je způsobeno difuzí atomů mědi do pájky a atomů cínu do mědi. IMC vrstva má teplotu tání okolo $415\text{ }^\circ\text{C}$. Při růstu tloušťky IMC vrstvy dochází v bezprostředním okolí k ochuzování pájky o cín [17].

Někdy se na rozhraní mědi a Cu_6Sn_5 vytvoří intermetalická sloučenina Cu_3Sn , jenž obsahuje větší množství mědi než Cu_6Sn_5 a je pro pájky nesmáčivá. Tato vrstva se tvoří, pokud je bráněno difuzi cínu do mědi, ale dochází k difuzi mědi do cínu. Cu_6Sn_5 je zde v podstatě jakousi bariérou bránící této difuzi. Tato sloučenina je tmavě šedá a její bod tání je přibližně $670\text{ }^\circ\text{C}$ [17].

Tloušťka IMC vrstvy závisí na teplotě a čase při určité aktivační energii, která v systému Sn-Cu odpovídá hodnotě zhruba $0,43\text{ eV}$. Růst této vrstvy lze vyjádřit následujícím vzorcem:

$$\delta = 10^3 \cdot \exp\left(\frac{-5 \cdot 10^3}{T}\right) \sqrt{t}, \quad (2.2)$$

kde δ je tloušťka IMC vrstvy [μm], t je čas [s] a T je teplota [K] [20].

Při opětovném ohřívání pájeného spoje (např. při opravách) dochází k velmi rychlému prorůstání vrstvy Cu_3Sn do Cu_6Sn_5 , což vede k nežádoucímu efektu nazývanému odsmačení. Pájka se z povrchu IMC vrstvy stahuje a shlukuje se do kapiček. Pro obnovu pájitelnosti povrchu je nutné nejdříve tuto vrstvu mechanicky odstranit nebo odleptat [17][18].

V tabulce 2.2 vidíme rozdíly mezi fyzikálními vlastnostmi jednotlivých prvků a intermetalických sloučenin. Největší rozdíl je vidět zejména v oblasti tvrdosti, která po té způsobuje křehkost vzniklého pájeného spoje, a proto se snažíme omezit růst IMC vrstev na nezbytně nutnou tloušťku.

Fyzikální vlastnosti, 25°C	Sn	Cu	Cu ₆ Sn ₅	Cu ₃ Sn
ρ_m objemová hmotnost [10 ³ ·kg·m ⁻³]	7,30	8,90	8,28	8,90
ρ elektrická rezistivita [10 ⁻⁸ ·Ω·m]	11,50	1,70	17,50	8,93
α_E koeficient teplotní roztlačnosti [10 ⁻⁶ ·K]	23,00	17,10	16,30	19,00
Yongův modul [GPa]	41,00	117,00	85,56	133,30
Vickersova tvrdost [MPa]	1000,00	300,00	3780,00	3650,00

Tabulka 2.3: Tabulka fyzikálních vlastností kovů a intermetalických sloučenin [2].

2.7 Metody hodnocení kvality pájeného spoje

Diagnostiku pájeného spoje provádíme těmito metodami:

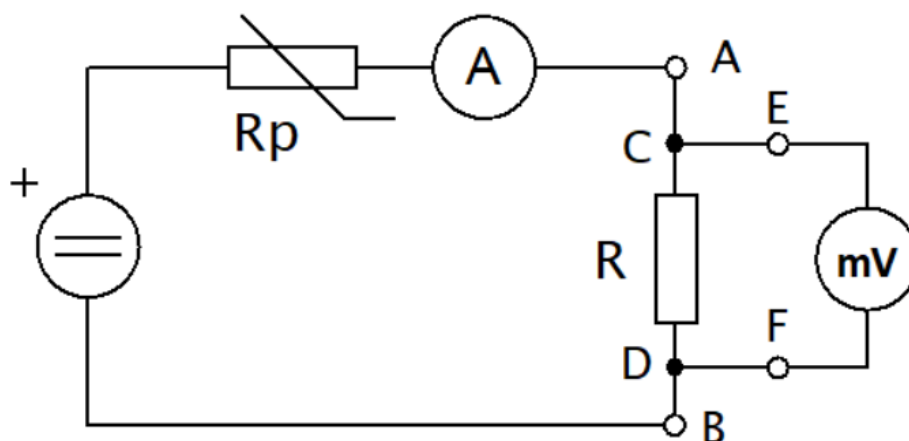
1. Nedestruktivní:
 - a) optická analýza
 - b) měření přechodového odporu spoje
 - c) RTG analýzy
 - d) funkční test
2. Destruktivní:
 - a) metalografický výbrus příčného spoje
 - o analýza optickým mikroskopem
 - o analýza elektronovým mikroskopem
 - b) mechanická zkouška stříhem

2.7.1 Měření přechodového odporu spoje

Měření provedeme pomocí čtyřbodové metody, protože tak eliminujeme vliv odporu přívodu a přechodových odporů svorek, což nám umožní měřit i

velmi malé odpory. Obvodem prochází konstantní proud, který vytváří úbytek napětí na měřeném rezistoru. Tento úbytek je přímo úměrný velikosti odporu. Schématické znázornění obvodu je na obrázku 2.10 [20].

Svorky A, B jsou proudové a svorky E, F jsou napěťové. Mezi svorkami C, D je připojen náš měřený odpor. Na DPS jsme osazovali rezistory o nominální velikosti 0Ω , naměřený odpor tedy odpovídá dvojnásobku odporu pájeného spoje, jelikož máme dva připájené kontakty [21].



Obrázek 2.11: Čtyřbodová metoda měření připojeného pájeného spoje.

Toto není klasická metoda pro hodnocení kvality pájeného spoje, jelikož na ni potřebujeme speciálně narženu DPS a v praxi nás spíše zajímá spoj vzniklý na DPS nějakého zařízení.

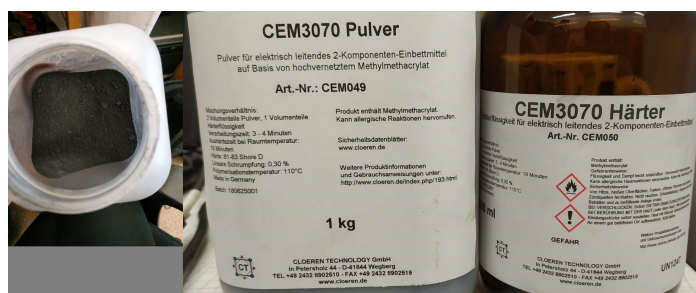
2.7.2 Metalografický výbrus příčného spoje

Proces výroby metalografického výbrusu příčného spoje lze rozdělit do několika fází:

- a) odběr a řezání vzorku
- b) preparace vzorku
- c) broušení
- d) leštění
- e) případné leptání vzorku

2. Rešerše na tematiku pájení přetavením

Odebraný čistý vzorek se umístí do formy, ve které je zalit směsí polymeru s uhlíkovými sazeňmi. Aby bylo možné zkoumat vzorek pod elektronovým mikroskopem, je potřeba totiž přítomnost vodivého materiálu. Podle zobrazovací metody volíme druh zalévací hmoty.



Obrázek 2.12: Sloučeniny na vytvoření námi použité zalévací hmoty.

Zalévací hmota se nechá vytvrdnout, poté je vzorek vložen do řezačky. Řezačka má diamantový kotouč o průměru 0,8 mm a je chlazená vodou, aby nedošlo k přehřátí vzorku. Ze vzorku odřezáváme postupně velmi tenké pláty a hledáme vhodnou rovinu řezu, kde už je vidět námi zkoumaný příčný řez vzorkem.

Následné broušení vzorku má minimalizovat povrchové nerovnosti a rýhy po řezání. Lze jej provádět ručně nebo mechanicky. Využívá se různé brusné roviny s hrubostí od 120 do 2000 dle normy FEPA, přičemž při přecházení z jedné brusné roviny do druhé je potřeba neustálé oplachování vzorku a přítomnost vody na brusném kotouči, aby se vzorek nepoškodil nebo se nezměnili jeho vlastnosti.

Dalším krokem je leštění vzorku. Na rozdíl od broušení materiál z povrchu vzorku téměř neubývá, ale je deformovaná pouze rovina řezu. Princip mechanického leštění je obdobný jako při broušení. Provádí se přitlačením vzorku na rotující leštící kotouč za přítomnosti leštícího média. K tomu se využívají kotouče s větší hrubostí (od 2000 výše) nebo různou povrchovou úpravou, např. keramický, tkanina, tvrdá guma. Leštící prostředek může mít podobu prášku, pasty nebo emulze, která již obsahuje další pomocné látky jako je smáčedlo či chladící médium. Emulze mohou být na olejové, lihové nebo vodní bázi, v nichž je rozpuštěn diamantový prach o různé hrubosti nebo se využívá například oxid hlinitý Al_2O_3 (korund), popřípadě Cr_2O_3 , MgO . V dnešní době je ke každému leštícímu kotouči určen typ příslušného leštícího média se správnou hrubostí obsaženého prachu [22].



(a) : Řezačka Mikron 110.



(b) : Leštička METKON FORCIPOL 102.

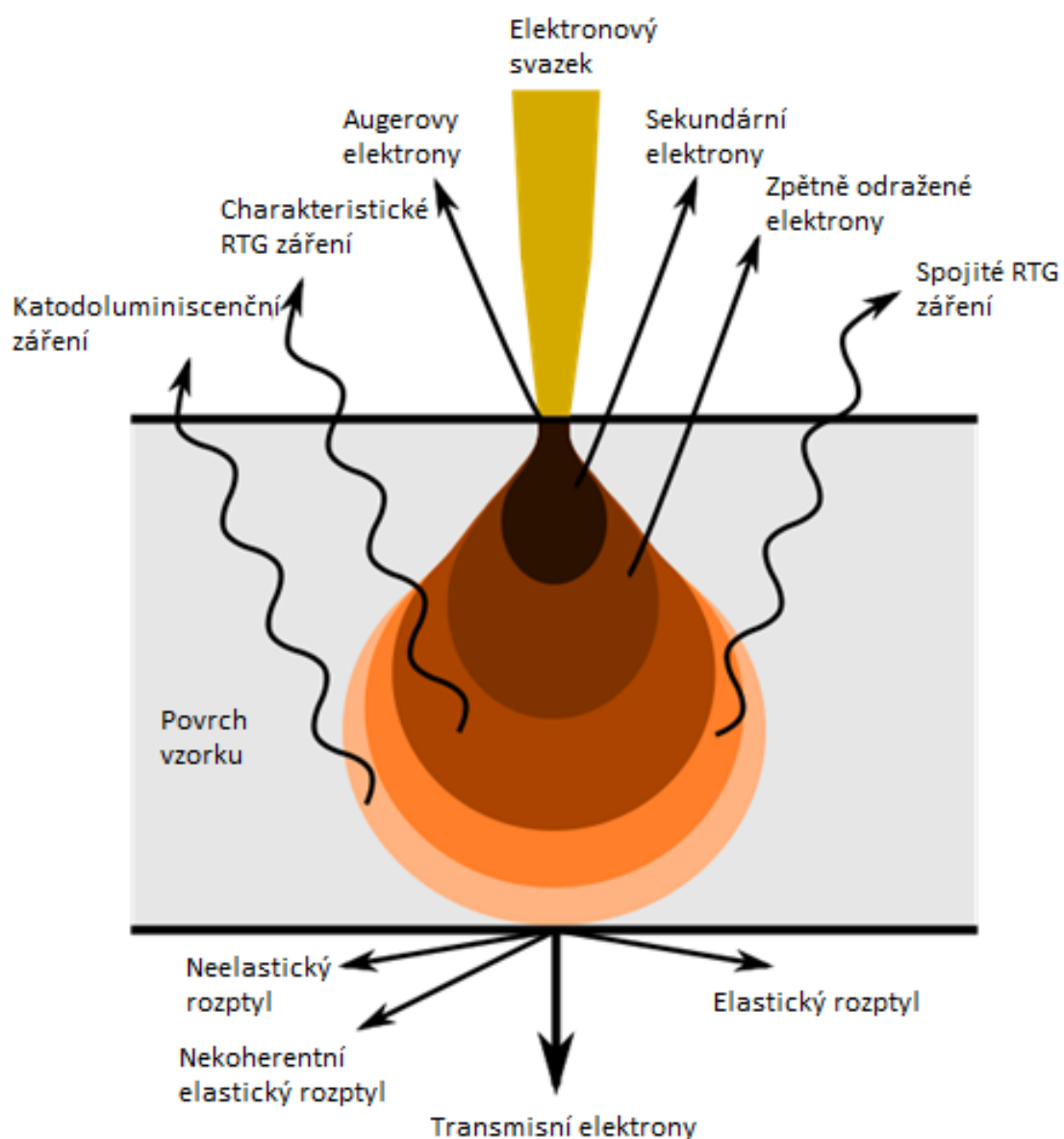
Obrázek 2.13: Námi použité přístroje pro vytvoření metalografického výbrusu.

Při tvorbě našeho výbrusu byla použita emulze na olejové bázi s diamantovým prachem o hrubosti 0,9 a 0,5 μm a korundem o hrubosti 0,2 μm , včetně všech zmíněných povrchových úprav kotoučů.



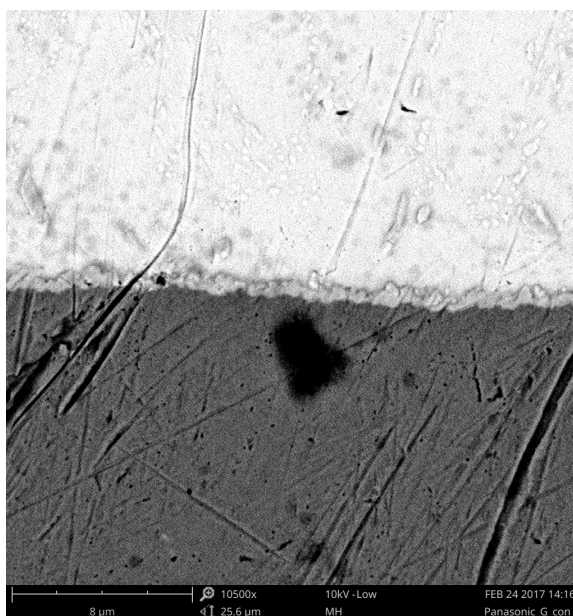
Obrázek 2.14: Použité kotouče pro tvorbu našeho výbrusu.

povrchu vzorku. Při reakci se vzorkem dochází k následujícím jevům viz obrázek 2.14.



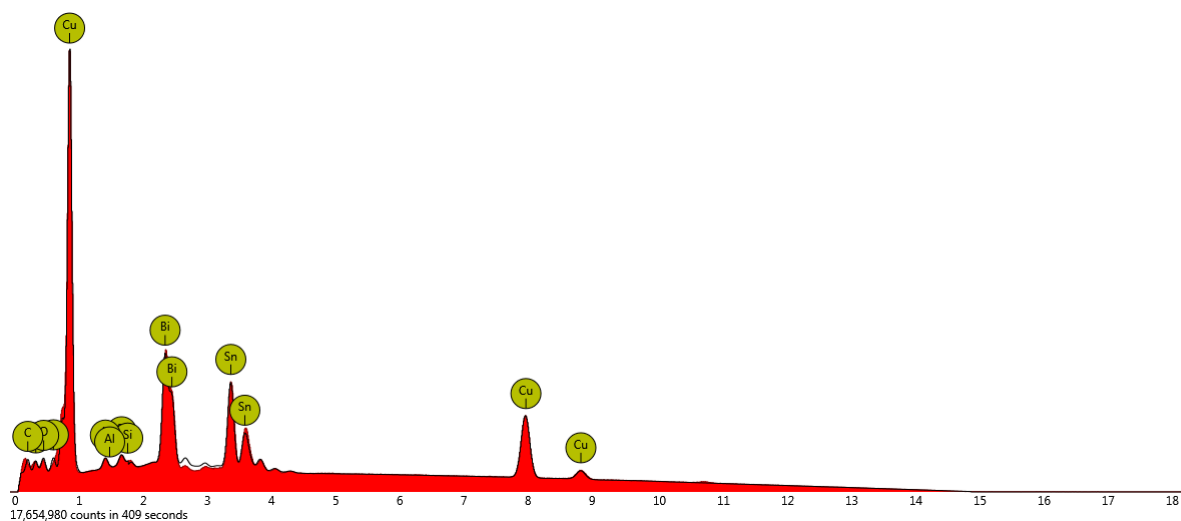
Obrázek 2.16: Jevy při zkoumání vzorku skenovacím elektronovým mikroskopem.

2. Rešerše na tematiku pájení přetavením



Obrázek 2.17: Ilustrační foto zkoumané IMC vrstvy pomocí mikroskopu SEM.

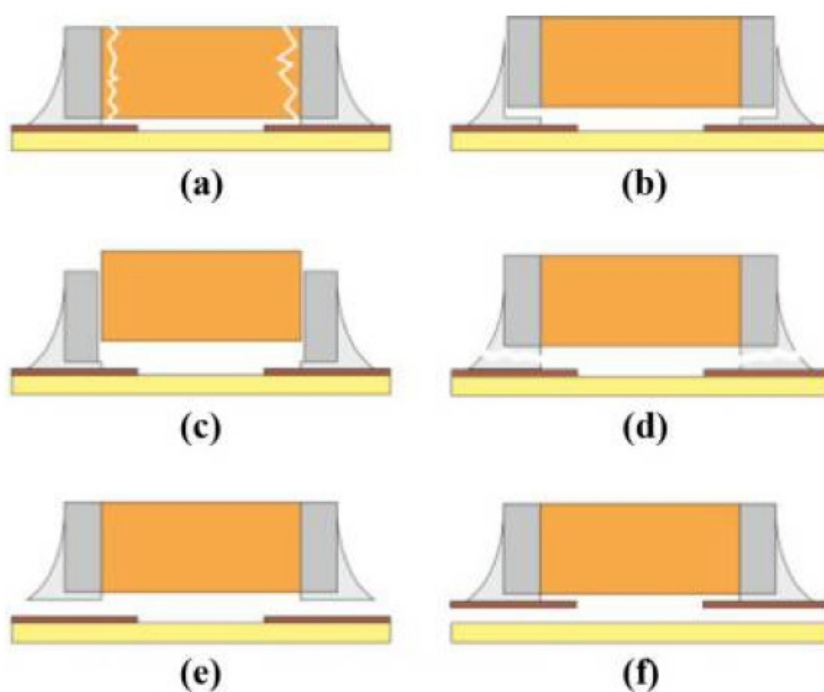
Pomocí elektronového mikroskopu je možné provést i prvkovou analýzu vzorku, využívá se přitom generace RTG paprsků. Každý prvek generuje RTG záření s různou energií a intenzitou.



Obrázek 2.18: Prvková analýza pájeného spoje.

2.7.3 Mechanická zkouška tahem

Tato zkouška je prováděna podle normy JESD22-B117A. Princip této zkoušky spočívá v působení hrotu testovacího zařízení na pájený spoj. Hrot testovacího zařízení se pohybuje rovnoměrně s rovinou DPS, rychlost pohybu je konstantní po celou dobu testování a hrot nesmí poškodit ostatní pájené spoje. Výstupem z této zkoušky je grafický záznam, který umožňuje analyzovat průběh deformace pájeného spoje a vyhodnotit maximální sílu, při které dojde k odtržení spoje od DPS, tzv. stříhová síla [2][23].



Obrázek 2.19: Možné výsledky mechanické zkoušky tahem: (a) zničení součástky, (b) oddělení IMC vrstvy mezi součástkou a pájkou, (c) oddělení vývodů součástky, (d) oddělení pájeného spoje, (e) oddělení IMC vrstvy mezi pájkou a padem, (f) oddělení pájeného padu [23]

Kapitola 3

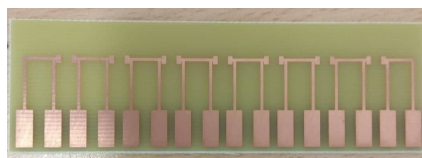
Návrh experimentu

V rámci bakalářské práce jsem provedla dva experimenty na ověření mé hypotézy, tj. že celý teplotní profil a jeho tvar má vliv na kvalitu pájeného spoje a nelze jej reprezentovat pouze heating factorem. Protože jeden heating factor může být shodný pro více teplotních profilů i přesto, že vznikl za různých podmínek. Protože teplotní profil má vliv na růst IMC vrstvy a tím i elektrické a mechanické vlastnosti pájeného spoje, budou právě tyto vlastnosti předmětem vyhodnocení experimentu.

Pro ověření mých hypotéz budu provádět tyto zkoušky:

1. čtyřbodová metoda
2. zkouška tahem
3. analýza elektronovým mikroskopem

3.1 Použité pasty, počet a typy vzorků



Obrázek 3.1: Neosazená testovací DPS.

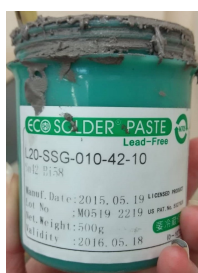
Zkoumala jsem celkem osm teplotních profilů ve dvou samostatných experimentech po čtyřech. Přičemž v každém byla použita jiná pasta s jiným složením tavidla, ale stejným poměrem složení bismutu a cínu (tedy Bi58Sn42).

3. Návrh experimentu

Navíc jsem tak svůj experiment obohatila o výsledek, jestli má tavidlo vliv na růst IMC vrstvy. Pro první experiment byly na každý teplotní profil použity 4 DPS osazené 7 rezistory a pro druhý případ na každý teplotní profil 5 DPS, rovněž osazených 7 rezistory.

Pájecí pasta	Výrobce	Průměr pájecích kuliček	Typ tavidla a jeho obsah	Použita v profilech
L20-SSG-010-42-10	Senju Metal Industry Co., LTD., Japan	25-36 μm	RMA, neznámý	A-D
NC-31	AMTECH, USA	25-45 μm	ROL1, 10 %	E-H

Tabulka 3.1: Seznam použitých past včetně typu tavidla.



(a) : Pasta zvolená pro první experiment.

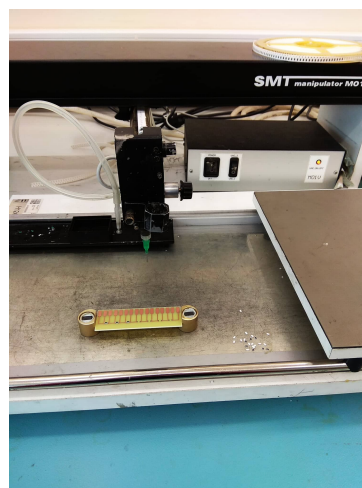


(b) : Pasta pro druhý experiment.

Obrázek 3.2: Použité pasty v této bakalářské práci.



(a) : Šablonový tisk.



(b) : Osazení DPS vakuovou pinzetou.

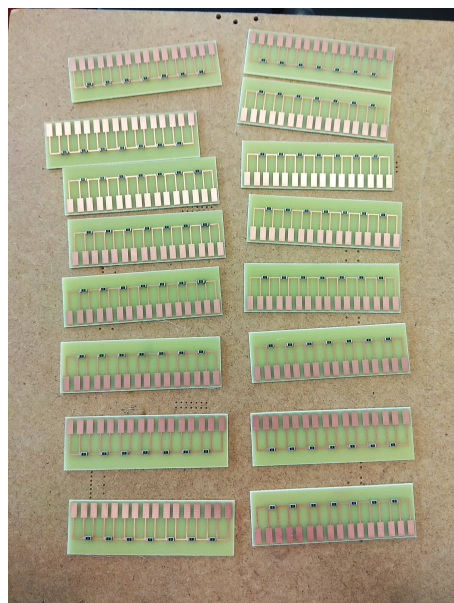
Obrázek 3.3: Příprava DPS před přetavením.

3.1. Použité pasty, počet a typy vzorků

DPS neměly speciální povrchovou úpravu mědi. K nanesení pájící pasty jsem využila šablonového tisku, abych tak zajistila rovnoměrné nanesení pájící pasty na všechny kontakty. Osazení DPS rezistory jsem provedla SMT manipulátorem (viz 3.3 (b)). Přetavení proběhlo v peci Mistral 260, která má tři zóny ohřevu, z nichž 2 jsou určeny pro preheat fázi (předehřev) a poslední pro teplotu, kdy dojde k přetavení (reflow). Dále je nutné ještě nastavit rychlost dopravníku. Takto vytvořím teplotní profily, jejichž heating factor bude shodný.



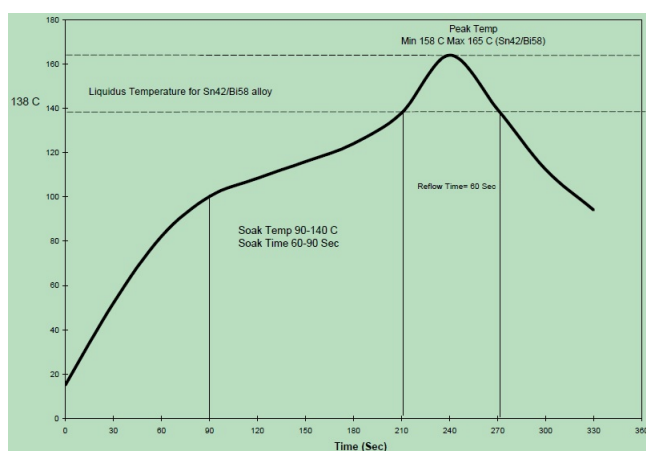
Obrázek 3.4: Zvolená pec Mistral 260.



Obrázek 3.5: Mnou osazené testované DPS.

3.2 Zvolené teplotní profily

V prvním experimentu jsem změnila celý teplotní profil, včetně preheat fáze. Při druhém experimentu jsem se naopak snažila vyloučit vliv preheat fáze, která byla zhruba konstantní, a měnit pouze oblast reflow. Proto jsem se v druhém experimentu držela více doporučení výrobce pasty a celkem dobře se mi povedlo napodobit teplotní profil jím určený.



Obrázek 3.6: Teplotní profil dodávavý výrobcem k pastě NC-31.[24]

Teplotní profil byl měřen za pomoci termočlánků připájených na DPS a umístěných tak, aby rovnoměrně zachytily průchod pecí (vynechala jsem krajní polohy, kde by ohřev nemusel být konstantní, viz obrázek 3.7).



Obrázek 3.7: Připojené termočlánky na testovací DPS před průjezdem pecí.

Zvolila jsem teplotu a posun dopravního pásu tak, aby při krajních případech (nízká rychlost a nízká teplota, nebo vysoká teplota a vysoká rychlost) byly heating factory ekvivalentní.

3.2. Zvolené teplotní profily

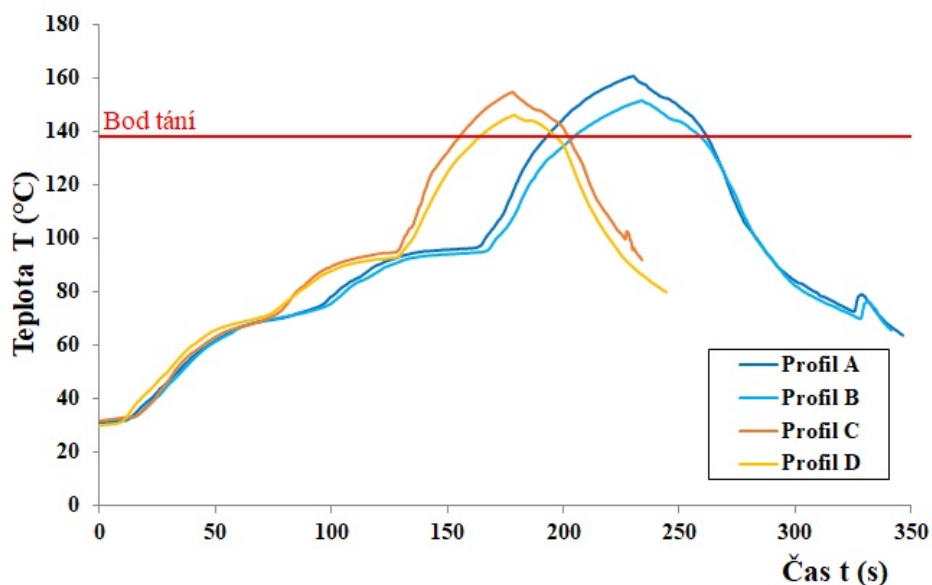
V prvním experimentu jsem tedy nastavila teploty na 80 °C a 100 °C v preheat fázi a pro reflow 165 °C nebo 175 °C. Rychlost dopravníku byla 15 cm/min nebo 24 cm/min po celou dobu průjezdu pecí, protože pro takovou rychlost nám při zvolené vyšší teplotě vyšel ekvivalentní heating factor k teplotnímu profilu s nižší teplotou při reflow. Z toho vyplývá, že pro rychlejší průjezd jsem ovlivnila i preheat fázi (což je vidět na obrázku 3.8), to jsem se v druhém experimentu snažila odbourat.

V tabulce 3.1 vidíme zmíněné teplotní profily, jejich označení a výsledný heating factor. Profil B a C jsou tedy teplotní profily s ekvivalentním heating factorem a budou nás dále nejvíce zajímat.

Označení	Teplotní Profil [°C + cm/min]	Heating Factor [K·s]
Profil A	80/100/175 + 15	1012
Profil B	80/100/165 + 15	502
Profil C	80/100/175 + 24	504
Profil D	80/100/165 + 24	226

Tabulka 3.2: Velikost heating factoru v prvním experimentu.

Dále na obrázku 3.8 vidíme grafické znázornění změřených teplotních profilů s vyznačenou oblastí heating factoru (nad vyznačeným bodem tání).



Obrázek 3.8: Teplotní profily pro první experiment.

3. Návrh experimentu

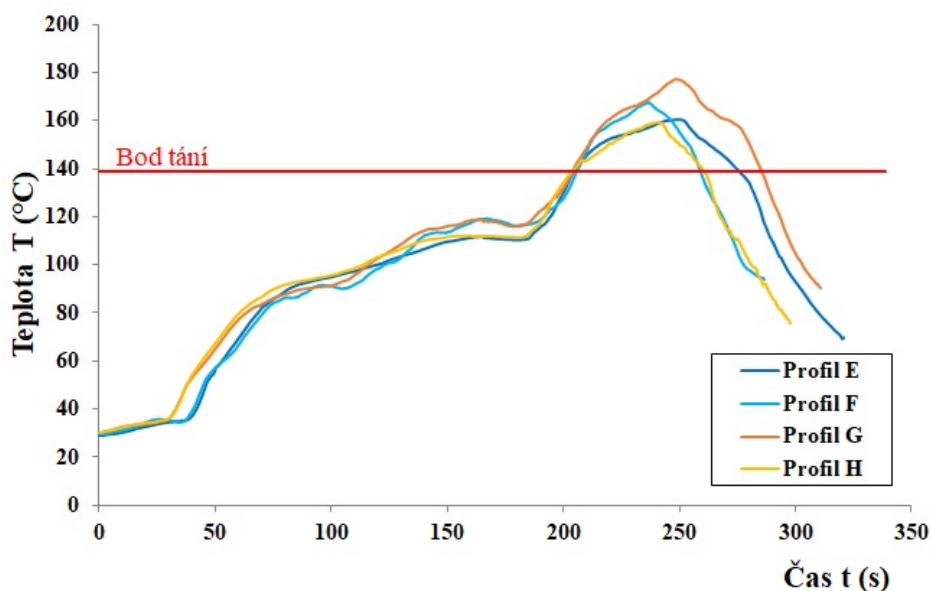
V druhém experimentu jsem nastavila teploty na 100 °C a 100 °C v preheat fázi a pro reflow 165 °C nebo 185 °C. Rychlost dopravníku byla pro preheat fázi vždy 15 cm/min, ale pro reflow jsem rychlost změnila mezi 15 cm/min a 29 cm/min, abych vytvořila ekvivalentní heating factor ke zvolenému nižšímu teplotnímu profilu. Rychlost se tedy změnila pouze v sektoru třetí zóny. Z toho plyne, že se mi podařilo odbourat vliv preheat fáze na experiment a napodobit teplotní profil výrobce.

V tabulce 3.2 vidíme zmíněné teplotní profily, jejich označení a výsledný heating factor. Profil E a F jsou teplotní profily s ekvivalentním heating factorem, kterým opět věnujeme největší pozornost.

Označení	Teplotní Profil [°C + cm/min]	Heating Factor [K·s]
Profil E	100/100/165 + 15	1090
Profil F	100/100/185 + 15, 29	1102
Profil G	100/100/185 + 15	2052
Profil H	100/100/165 + 15, 29	783

Tabulka 3.3: Velikost heating factoru v druhém experimentu.

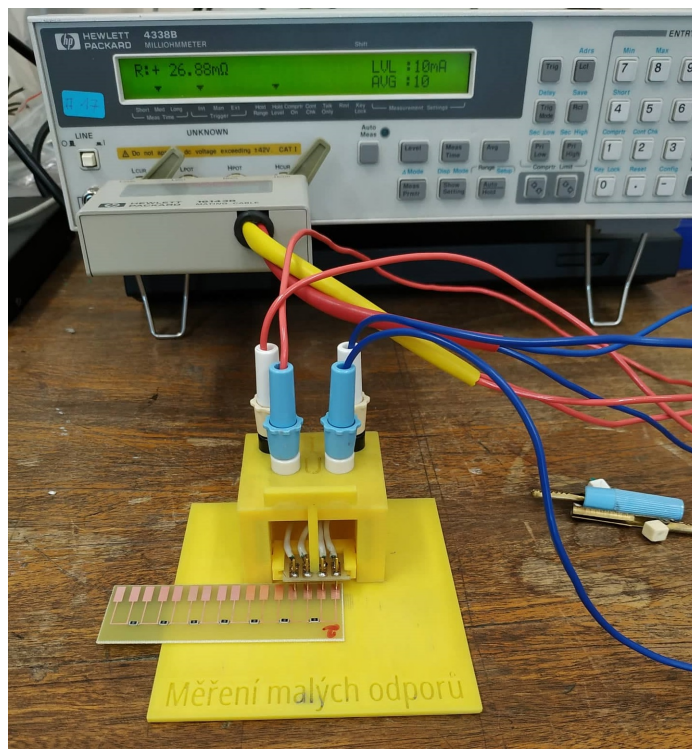
Na obrázku 3.9 grafické znázornění změřených teplotních profilů s vyznačenou oblastí heating factoru (nad vyznačeným bodem tání).



Obrázek 3.9: Teplotní profily pro druhý experiment.

3.3 Čtyřbodová metoda

V části, kde jsem zkoumala vliv teplotního profilu na elektrické vlastnosti pájeného spoje, jsem využila čtyřbodové metody. Vzorek byl vložen do přípravku, určeného pro měření malých odporů, který měl vyvedené hroty proudové a napěťové sondy na zkušební pady. Jako měřicí přístroj jsem použila miliohmometr 4338B od Hewlett Packard. Změřila jsem celkový odpor na dvou pájených spojích. Poté jsem pomocí menších hrotů změřila přímo odpor rezistoru, který byl připájen. Měření jsem provedla na několika DPS, poté jsem jeho průměrnou hodnotu odečetla od hodnoty naměřené na pájeném spoji. Povedlo se mi tedy zjistit, jaký odpor mám na jednom pájeném spoji pro jednotlivé teplotní profily.

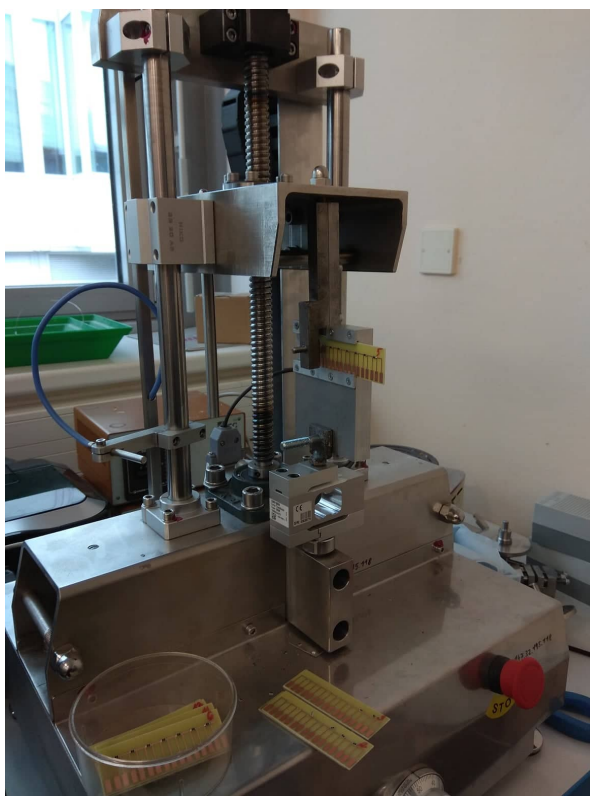


Obrázek 3.10: Přípravek na měření odporu pomocí čtyřbodové metody.

Pro první experiment jsem měla k dispozici 112 naměřených hodnot, 28 hodnot pro každý teplotní profil. Pro druhý experiment jsem měla k dispozici 140 hodnot, z nichž na každý teplotní profil připadalo 35 hodnot.

3.4 Zkouška tahem

Zkoušku tahem jsem provedla na trhačce se speciálním trnem. Působící síla byla rovnoměrně rozložena mezi oba zapájené spoje držící odpor a aby zkouška odpovídala normě JESD22-B117A. Trhačka (DEFORM 02 od firmy Pemar) je řízena programem z počítače a její rychlost posuvu byla konstantně nastavena na 1mm/min. Postupně byly odtrhány všechny rezistory z destičky a pro každý byla vyhodnocena maximální stříhová síla.



Obrázek 3.11: Trhačka se speciálním trnem ke zkoušce tahem.

Pro první experiment jsem měla k dispozici od každého teplotního profilu tři destičky, celkem tedy 84 hodnot. Pro druhý experiment připadly na každý teplotní profil 4 destičky, tedy 112 hodnot celkem. Pro každý experiment jsem si schovala 4 destičky (od každého teplotního profilu jednu), pro pozdější vytvoření metalografického výbrusu, ke zkoumání na elektronovém mikroskopu.

3.5 Analýza elektronovým mikroskopem

Pro každý teplotní profil zbyla jedna destička, ze které nebyly odtrhány rezistory. Ty byly nařezány a zataveny do směsi polymeru s uhlíkovými sazelemi, aby bylo možné vzorek použít při snímání elektronovým mikroskopem. Následně byly vzorky broušeny, leštěny a leptány (viz kapitola 2.5.2).



Obrázek 3.12: Vytvořené výbrusy. Vlevo vzorek pro první experiment a vpravo pro druhý.

Výbrusy jsem vložila do elektronového mikroskopu a postupně jsem proměřila všechny pájené spoje. Pro každý jsem vytvořila tři snímky. Jeden na okraji, druhý uprostřed a třetí co nejlíže součástce. Abych mohla porovnat tloušťku IMC vrstvy v celém pájeném spoji pro jednotlivé teplotní profily. Vzniklo tak pro každý experiment 48 fotek IMC vrstvy.

Dále jsem pak jednotlivé fotky upravovala v programu NIS-Elements BR, kde jsem vytvořila binární mapy intermetalické vrstvy. V podstatě se v programu vyznačí IMC vrstva a ten pak daný obrázek převede do černé a bílé barvy tak, aby jej bylo možné dále používat v jiném programu, samozřejmě je nutné si obrázek okvótovat. Tedy mít přepočít, kolik nm odpovídá jednomu pixelu.



Obrázek 3.13: Vytvořená binární mapa v programu NIS-Elements BR.

3. Návrh experimentu

Obrázek binární mapy se pak vloží do skriptu v matematickém simulátoru MATLAB, který obrázek převede na matici jedniček a nul. Přičemž bílé barvě přiřadí jedničku a černé nulu. Následně sečte všechny jedničky v každém sloupci matice a pomocí přepočtu, kolik nm připadá na 1 pixel, provede výpočet tloušťky i se směrodatnou odchylkou. Pro jeden obrázek udělá program tolik měření, jaká je šířka obrázku v pixelech. Jde tedy o velmi přesné měření tloušťky IMC vrstvy.

Poté jsem pomocí elektronového mikroskopu (Phenom ProX) provedla ještě prvkovou analýzu pájeného spoje pro každý teplotní profil. Analyzovala jsem nejen celou mapu, kterou pájka vytvořila, ale použila jsem i funkci linescan, která umožňuje provést prvkovou analýzu podél zvolené přímky. V našem případě podél přímky napříč intermetalickou vrstvou. Díky liniovému skenu budu moct přesněji určit poměr cínu a mědi v oblasti IMC a vyhodnotit o jakou intermetalickou sloučeninu se jedná.



Obrázek 3.14: Mnou zvolený elektronový mikroskop Phenom ProX.

Kapitola 4

Vyhodnocení experimentu

4.1 Vyhodnocení čtyřbodové metody

Nameřené hodnoty na přípravku pro měření malých odporů jsem zpracovala v excelu. Po odečtení průměrného odporu připájeného rezistoru a vydělení dvěma (2 spoje na jednom rezistoru), mi vyšly hodnoty, které vidíme v tabulce 4.1 a tabulce 4.2 pro jednotlivé experimenty.

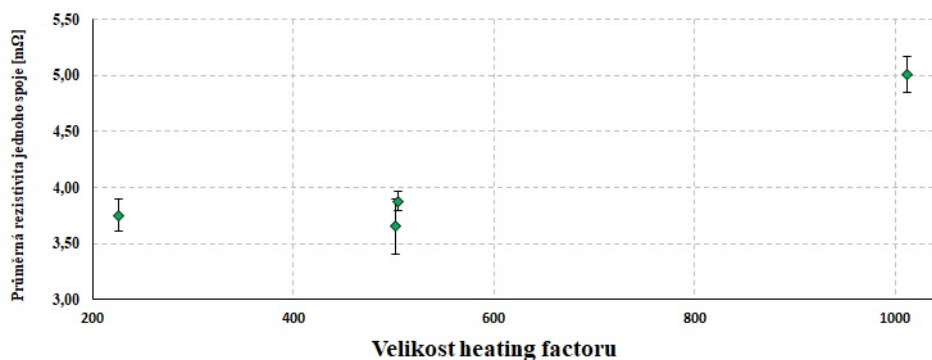
	Heating factor [K·s]	Průměrný odpor [mΩ]	σ [mΩ]
Profil A	1012	5,01	0,16
Profil B	502	3,66	0,25
Profil C	504	3,88	0,08
Profil D	226	3,75	0,14

Tabulka 4.1: Naměřené hodnoty v prvním experimentu pro čtyřbodovou metodu.

V tabulce 4.1 vidíme, že pro první experiment nám i přes ekvivalentní heating factory (profil B a C) vychází mírně větší odpor u profilu s vyšší teplotou v reflow. Dále vidíme, že s heating factorem nám roste i odpor pájeného spoje, což je zapříčiněno větším růstem IMC vrstvy, která má větší rezistivitu než pájka.

Data jsem vynesla i do přehledného grafu (obrázek 4.1), ve kterém je trend růstu odporu s heating factorem jasně patrný.

4. Vyhodnocení experimentu



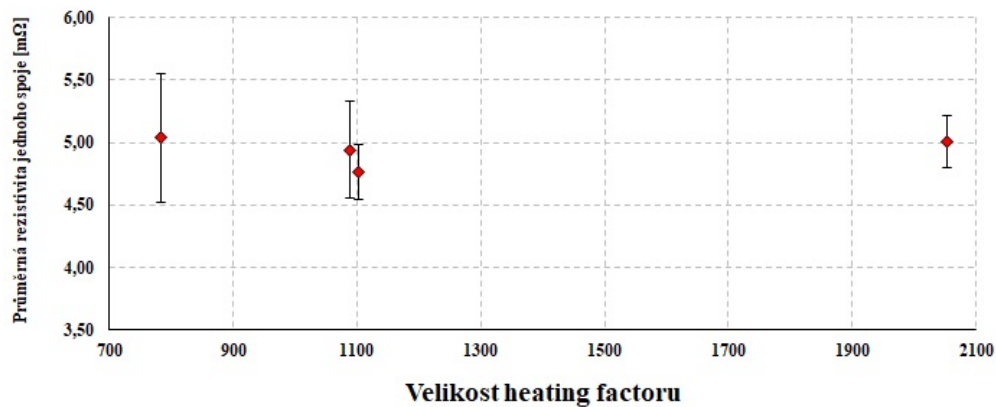
Obrázek 4.1: Závislost průměrné rezistivity na heating factoru pro první experiment.

V tabulce 4.2 vidíme výsledky pro druhý experiment. Opět nám pro ekvivalentní heating factory (profil E a F) vychází mírně odlišné hodnoty, ale je zde jasně vidět, že pokud jsme vyloučili vliv preheat fáze na experiment, je rozdíl menší.

	Heating factor [K·s]	Průměrný odpor [mΩ]	σ [mΩ]
Profil E	1090	4,94	0,39
Profil F	1102	4,77	0,22
Profil G	2052	5,01	0,21
Profil H	783	5,04	0,52

Tabulka 4.2: Naměřené hodnoty v druhém experimentu pro čtyřbodovou metodu.

Odpory nám v druhém experimentu vycházejí vyšší, protože i heating factory jsou zde větší. Tedy potvrdil se nám trend s růstem odporu spoje spolu s heating factorem, který se ale od určité hodnoty heating factoru ustálí a stane se konstantním (viz obrázek 4.2). Může to být zapříčiněno i tím, že v druhém experimentu jsem neměnila preheat fázi, navíc byla použita pasta obsahující tavidlo ROL1, které nepodporuje růst IMC vrstvy tolik jako RMA tavidlo obsažené v pastě z prvního experimentu, takže růst intermetalické vrstvy nebyl tak razantní. Proto jsou elektrické vlastnosti spoje při druhém experimentu téměř srovnatelné pro všechny profily.



Obrázek 4.2: Závislost průměrné rezistivity na heating factoru pro druhý experiment.

4.2 Vyhodnocení zkoušky tahem

Všechny naměřené hodnoty byly programem trhačky vygenerovány do textových souborů. Ty jsem následně exportovala do excelu a vyhledala námi hledanou stříhovou sílu. Tedy sílu, kdy byl odpor mechanicky odstraněn hrotem trhačky z DPS. Průměrné hodnoty pro jednotlivé experimenty vidíme v tabulce 4.3 a 4.4.

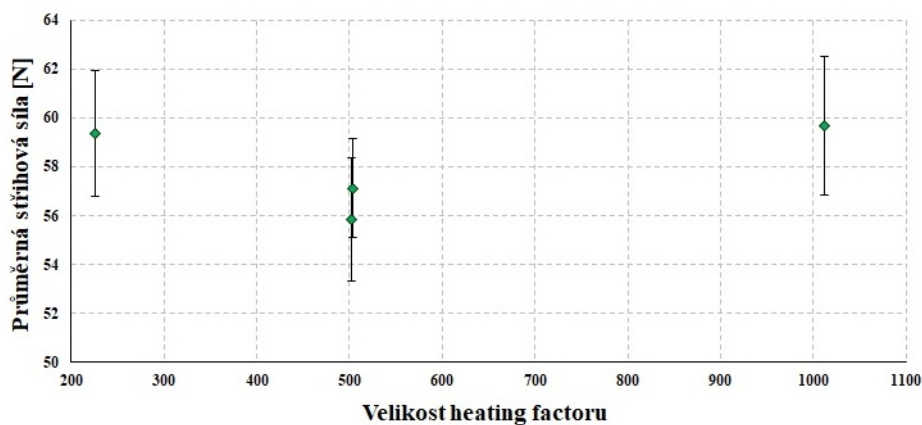
	Heating factor [K·s]	Prům. stříhová síla [N]	σ [N]
Profil A	1012	59,68	2,83
Profil B	502	55,84	2,50
Profil C	504	57,12	2,04
Profil D	226	59,37	2,56

Tabulka 4.3: Naměřené hodnoty v prvním experimentu pro zkoušku tahem.

V tabulce 4.3 je vidět nárůst stříhové síly s heating factorem pro první experiment. Spoj je samozřejmě pevnější, protože IMC vrstva napomáhá spojení pájky s DPS. Pro ekvivalentní profily (profil B a C) jsou rozdíly mezi stříhovými silami neprůkazné.

Rostoucí trend stříhové síly s rostoucím heating factorem pozorujeme na grafickém znázornění závislosti na obrázku 4.3.

4. Vyhodnocení experimentu



Obrázek 4.3: Závislost průměrné sřihové síly na heating factoru pro první experiment.

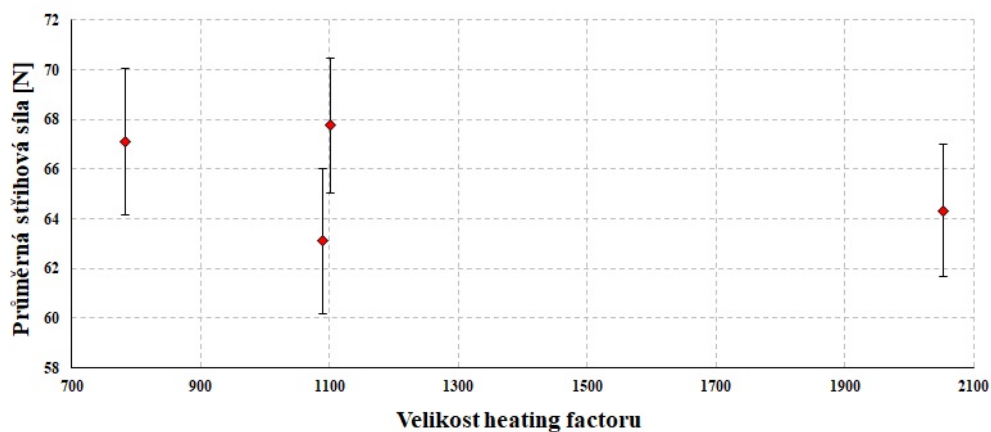
Pro druhý experiment máme výsledky v tabulce 4.4. Zde už jsou rozdíly mezi ekvivalentními profily (profil E a F) znatelnější. Vyloučením vlivu preheat fáze hodnotíme vliv pouze reflow fáze. Vidíme, že i přes ekvivalentnost profilů jsou mechanické vlastnosti spoje rozdílné.

	Heating factor [K·s]	Prům. sřihová síla [N]	σ [N]
Profil E	1090	63,10	2,91
Profil F	1102	67,11	2,94
Profil G	2052	64,33	2,66
Profil H	783	67,76	2,70

Tabulka 4.4: Naměřené hodnoty v druhém experimentu pro zkoušku tahem.

Jak jsem v prvním experimentu prokázala, mechanická pevnost spoje rostla s heating factorem, ale jak už z teorie víme, tato pevnost neroste do nekonečna. Po překročení určité tloušťky IMC vrstvy nastane opačný efekt, jelikož IMC vrstva je křehčí a má odlišné fyzikální vlastnosti (viz kapitola 2.4.1, tabulka 2.2), začne se sřihová síla pro vyšší heating factor zmenšovat, což je zřejmé z obrázku 4.4.

4.3. Vyhodnocení analýzy elektronovým mikroskopem



Obrázek 4.4: Závislost průměrné stříhové síly na heating factoru pro druhý experiment.

4.3 Vyhodnocení analýzy elektronovým mikroskopem

Před měřením elektronovým mikroskopem byl vzorek očištěn a vložen do vodivého držáku. Poté byly pořízeny fotky jednotlivých pájených spojů pro každý teplotní profil a pro každý experiment. Mikroskopování probíhalo při zvětšení 10000x a urychlovací napětí bylo 10kV.

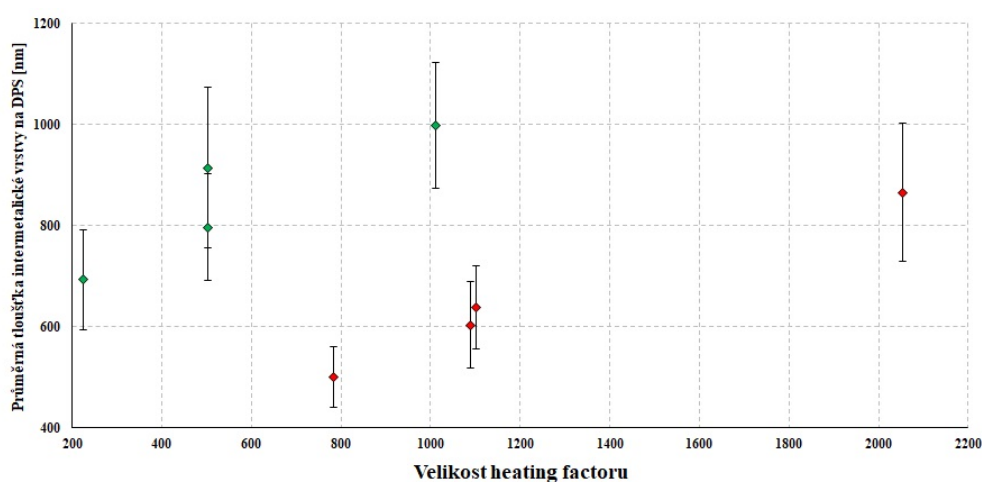
Označení	Heating Factor [K·s]	Prům.tloušťka IMC vrstvy na DPS [nm]	σ [nm]
Profil A	504	796,73	106,09
Profil B	502	914,69	159,49
Profil C	1012	999,09	124,80
Profil D	226	692,57	99,35
Profil E	1090	603,46	85,88
Profil F	1102	638,44	82,47
Profil G	2052	865,67	137,44
Profil H	783	500,00	59,32

Tabulka 4.5: Naměřené hodnoty průměrné tloušťky IMC vrstvy pro oba experimenty.

Následovalo zpracování fotek v programu NIS-Elements BR a pak MATLABU.

4. Vyhodnocení experimentu

Výsledky pro oba experimenty můžeme vidět v tabulce 4.5. V ní je patrný předěl mezi experimentem jedna a dva. Ten je zapříčiněn tím, že jsem v prvním experimentu změnila i oblast preheat fáze a je také ovlivněn použitím dvou past s různými tavidly. Z toho nám ale jasně vyplývá, že na tvorbu IMC vrstvy má značný vliv i tavidlo obsažené v pastě. Pro první experiment byla použita pasta s RMA tavidlem, které vytváří lepší podmínky pro růst IMC vrstvy.



Obrázek 4.5: Závislost průměrné tloušťky IMC vrstvy na heating factoru pro oba experimenty.

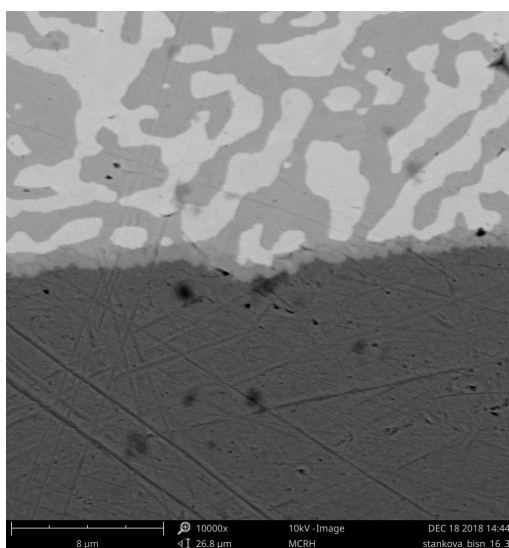
Ve vynesném grafu závislosti (Obrázek 4.5) vidíme trend růstu IMC vrstvy s heating factorem. Navíc, pokud se ovlivňuje i preheat fáze procesu, je sklon růstu dramatičtější i pro menší heating factory. Tudíž růst IMC vrstvy závisí nejen na heating factoru, ale na celkové době, kterou pájený spoj tráví v peci a na teplotě při celém procesu přetavení, jak jsem předpokládala.

Pro naše ekvivalentní profily v experimentu číslo jedna (profil B a C) lze vidět, že růst IMC vrstvy není stejný. Z toho jasně vyplývá, že i přes stejný heating factor není růst IMC vrstvy totožný, a z toho plynou i rozdílné elektrické a mechanické vlastnosti. Proto by heating factor nemohl být použit jako predikce růstu intermetalické vrstvy.

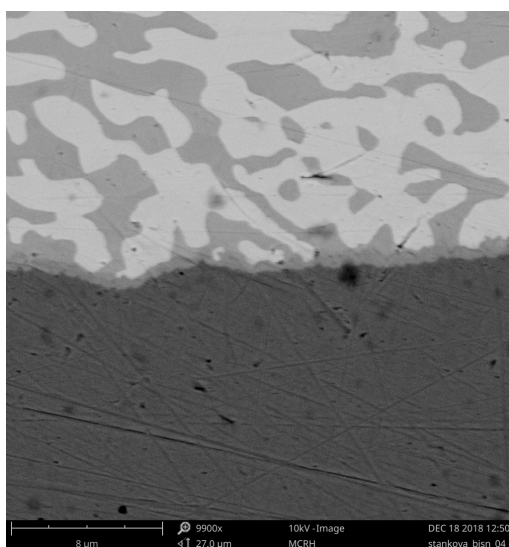
Pro druhý experiment nejsou rozdíly u ekvivalentních profilů (profil E a F) tak značné. IMC vrstva je pro tyto profily stejná. Zde by se heating factor dal použít jako předpoklad pro růst IMC vrstvy. Na mechanických vlastnostech

4.3. Vyhodnocení analýzy elektronovým mikroskopem

pájeného spoje se však projevila zvýšená křehkost spojů vytvořených profilem E, který byl v horkovzdušné peci déle, ale neprošel tak vysokou teplotou při reflow.

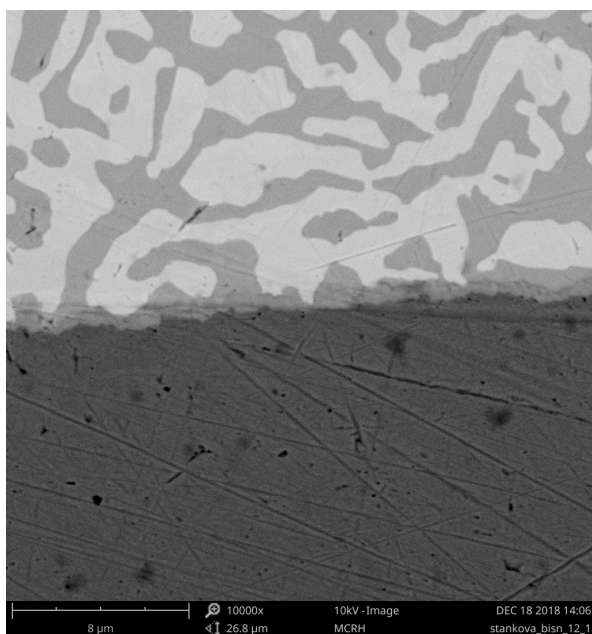


Obrázek 4.6: Snímek z elektronového mikroskopu IMC vrstvy pro profil A.

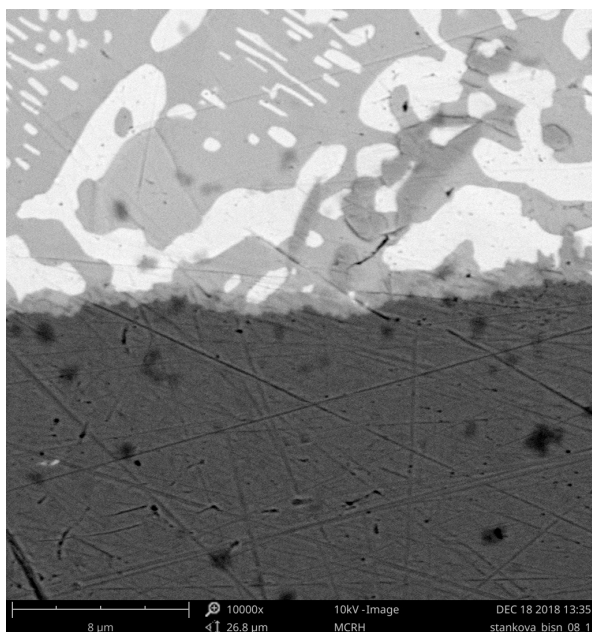


Obrázek 4.7: Snímek z elektronového mikroskopu IMC vrstvy pro profil B.

4. Vyhodnocení experimentu

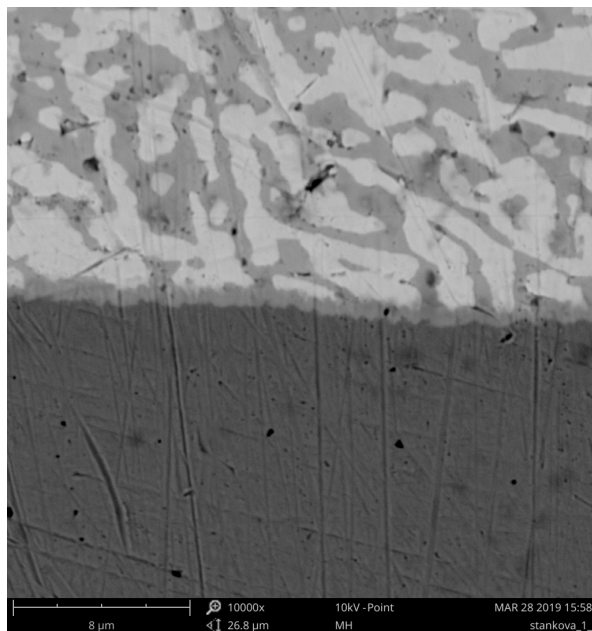


Obrázek 4.8: Snímek z elektronového mikroskopu IMC vrstvy pro profil C.

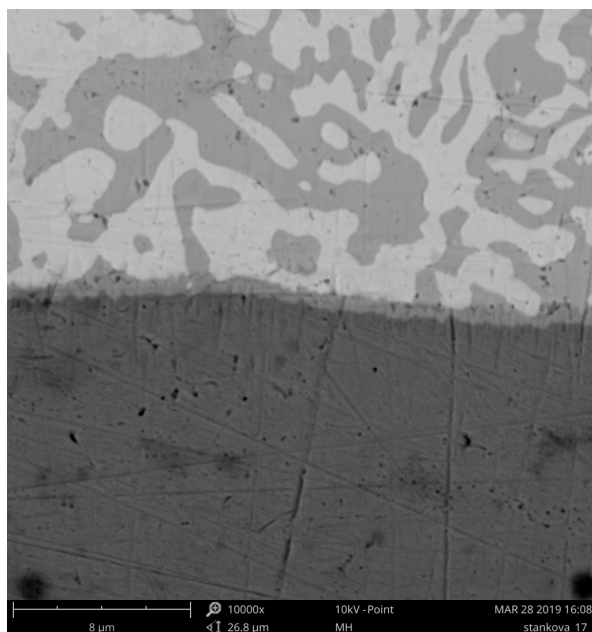


Obrázek 4.9: Snímek z elektronového mikroskopu IMC vrstvy pro profil D.

4.3. Vyhodnocení analýzy elektronovým mikroskopem

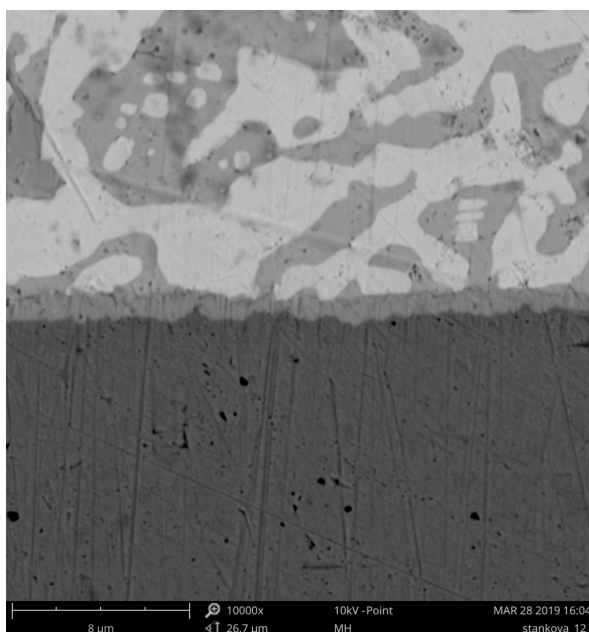


Obrázek 4.10: Snímek z elektronového mikroskopu IMC vrstvy pro profil E.

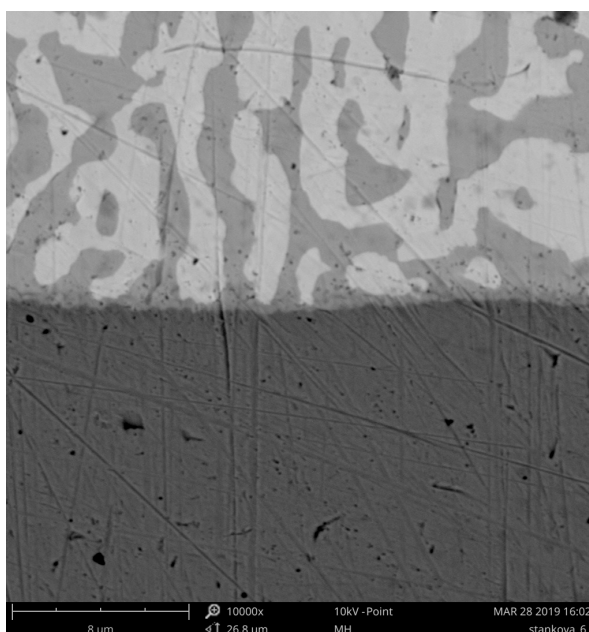


Obrázek 4.11: Snímek z elektronového mikroskopu IMC vrstvy pro profil F.

4. Vyhodnocení experimentu



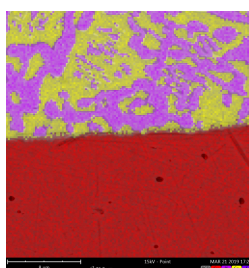
Obrázek 4.12: Snímek z elektronového mikroskopu IMC vrstvy pro profil G.



Obrázek 4.13: Snímek z elektronového mikroskopu IMC vrstvy pro profil H.

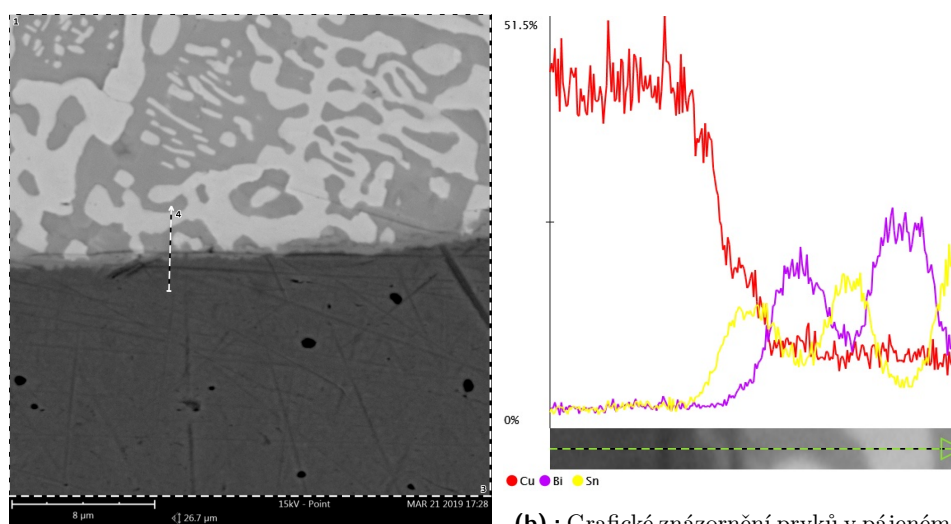
4.3. Vyhodnocení analýzy elektronovým mikroskopem

Na obrázku 4.6 až 4.13 vidíme jednotlivé snímky IMC z elektronového mikroskopu. Dále je na nich dobře patrná mapa, kterou tvoří cín a bismut obsaženy v pájce. Přesné rozložení prvků v pájeném spoji pak vidíme na obrázku 4.14. V obrázku 4.15 (b), kde jsme využili funkce linescan, lze pozorovat, že tam kde je přítomen cín není bismut a naopak. Proto tyto dva prvky tvoří v pájeném spoji zmíněné mapy.



Obrázek 4.14: Mapa rozložení Sn a Bi v pájeném spoji profilu E.

Navíc na rozhraní, kde očekáváme intermetalickou vrstvu, vidíme, že poměr Cu k Sn je přibližně 20 % ku 15 %. Tenhle poměr nejlépe odpovídá sloučenině Cu_6Sn_5 . Tohle se ale dalo předpokládat, jelikož IMC vrstva je světlá a ne tmavá, navíc byl spoj tepelně nezatížen. To signalizuje, že intermetalickou sloučeninou je zde Cu_6Sn_5 a ne Cu_3Sn .



(a) : Linescan napříč IMC vrstvou.

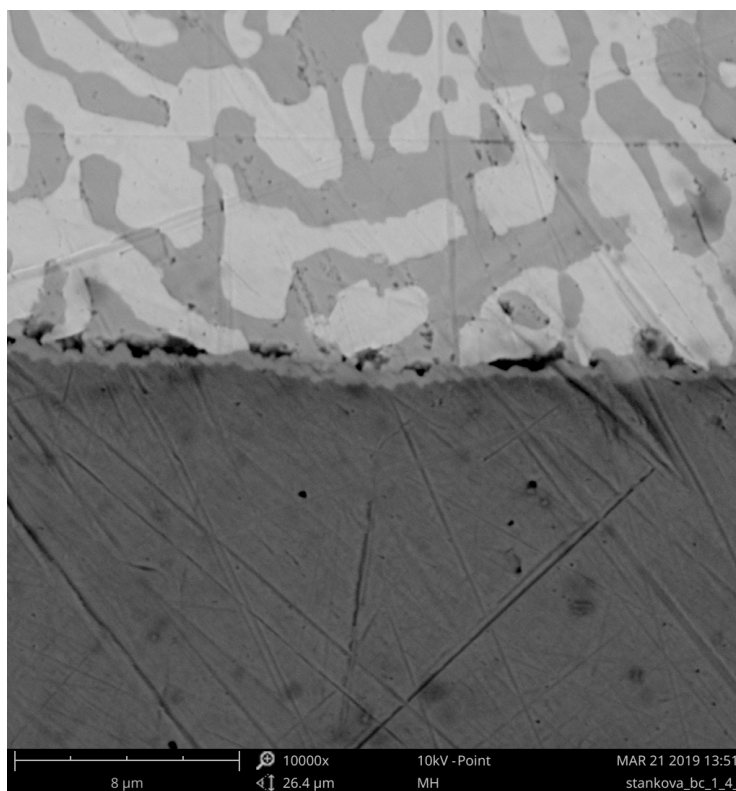
(b) : Grafické znázornění prvků v pájeném spoji podél přímky.

Obrázek 4.15: Spektrální analýza profilu E.

4. Vyhodnocení experimentu

Dále jsme kolem IMC vrstvy pro profil E pozorovali voidy, které mohou být způsobeny nedostatečným vypařením tavidla z pájky. To znamená, že i přes dodržení předepsaného teplotního profilu výrobcem může dojít k chybám v pájeném spoji a že by pro heating factor, který vznikl při nižší teplotě v reflow a pomalejší rychlostí dopravníku, měla být preheat fáze vyšší, aby došlo lépe k aktivaci tavidla, které se v reflow nestačilo celé odpařit. Jelikož se jedná o ekvivalentní profil a u profilu F se toto neobjevilo, je i tohle jistým indikátorem, že na tom jak heating factor vzniká záleží. Výskyt voidů tedy pravděpodobně způsobil nižší mechanickou odolnost spoje a proto se profily E a F liší, ačkoli tloušťka IMC vrstvy je pro tyto dva profily prakticky stejná.

Vidíme tedy, že pro druhý experiment se sice heating factor dá použít jako predikce růstu intermetalické vrstvy, ale nejde použít jako indikátor kvality vznikajícího pájeného spoje.



Obrázek 4.16: Voidy kolem IMC vrstvy pro profil E.

Kapitola 5

Ekonomické zhodnocení bezolovnatých past

V této části se zaměřím na zhodnocení bezolovnatých nízkotavitelných past Sn42Bi58 (použitou v experimentální části) z ekonomického pohledu. Podívám se na její výhody a nevýhody oproti klasické bezolovnaté pastě SAC305. Dále se pokusím porovnat náklady při procesu pájení přetavením při použití bezolovnaté nízkotavitelné pájecí pasty a klasické bezolovnaté pájecí pasty.

Pájení přetavením je jedním z několika dílčích kroků v technologii povrchové montáže. V rámci výroby osazených DPS potřebujeme několik zařízení. Jedná se hlavně o zařízení na šablonový tisk, osazovací automat a přetavovací pec. Dále je potřeba vysoušecí skříň pro skladování a vysoušení součástek citlivých na vlhkost, které by se mohly při špatném skladování, v závislosti na třídě citlivosti, při ohřevu v rámci pájení přetavením poškodit. Další nedílnou součástí výrobní linky by měl být automat provádějící optickou kontrolu.

Ovšem v rámci ekonomického porovnání bezolovnatých nízkotavitelných past vůči klasické SAC pastě jsou všechna výše zmíněná zařízení potřebná pro obě linky. Tedy náklady na jejich pořízení jsou náklady utopenými a při porovnání je můžeme zanedbat.

Vzhledem k tomu, jaká data jsem měla k dispozici, provedu zhodnocení těchto dvou past z hlediska ceny pasty, zmetkovitosti a množství energie potřebné k jejímu přetavení, což jsou jediné rozdílné faktory pro mé dvě pasty. Pro jednoduchost vezmu data za jeden rok. Zajímají mě čistě provozní náklady, protože jen v nich se projeví rozdíly mezi těmito pastami. Proto se dále budu zabývat jen marginálními náklady, které mi pomohou rozhodnout, která z past bude výhodnější.

5.1 Náklady na energii

5.1.1 Spotřeba pájecí pece

Měřením příkonu pájecí pece jsem zjistila hodinovou spotřebu elektrické energie při pájení nízkotavitelnou bismutovou pastou na 1,06kWh a spotřebu při použití SAC pasty na 1,53kWh. Roční spotřebu elektrické energie určím přenásobením hodinové spotřeby počtem pracovních hodin v měsíci, tj. 168 a počtem měsíců za rok.

$$E_{rok} = E_{den} \cdot 168 \cdot 12 \quad [kWh] \quad (5.1)$$

$$E_{rok} = 1,06 \cdot 168 \cdot 12 = 2,15MWh$$

$$E_{rok} = 1,53 \cdot 168 \cdot 12 = 3,09MWh$$

Pomocí vzorce (5.1) jsem určila, že výsledné roční spotřeby se rovnají 2,15 MWh pro bismutovou pastu resp. 3,09 MWh pro SAC pastu. S těmito hodnotami spotřeby budu nadále počítat.

5.1.2 Cena a spotřeba elektrické energie

Předpokládáme, že se nacházíme v Praze. Poskytovatelem elektrické energie bude firma PRE, a.s. a distribuční společností bude firma PREdistribuce, a.s.. Vybrali jsme tarif C02d pro malé a střední podniky. Dále předpokládáme jistič o velikosti 3x40 A, podle předpokládaného příkonu naší malé pájecí linky. V následující tabulce máme soupis jednotlivých cen v rámci našeho tarifu z ceníku pro rok 2019.

Distribuční sazba	vysoký tarif	1669,00	[Kč/MWh]
	nízky tarif	-	[Kč/MWh]
Měsíční poplatek za odběrné místo		99,00	[Kč/měsíc]
Daň z elektřiny		28,30	[Kč/MWh]
Cena silové elektřiny	vysoký tarif	2440,34	[Kč/MWh]
	nízky tarif	-	[Kč/MWh]
Cena za jistič	nad 3x32A-3x40A včetně	198,00	[Kč/měsíc]
POZE	dle jističe	13,56	[Kč/A/měsíc]
POZE	dle spotřeby	495,00	[Kč/MWh]
systémové služby		76,19	[Kč/MWh]
OTE		6,93	[Kč/měsíc]

Tabulka 5.1: Tabulka složení ceny elektrické energie z ceníku PRE, a.s. pro tarif C02d [25].

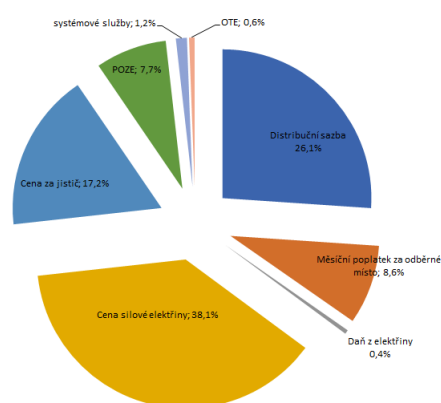
5.1. Náklady na energii

Jako cenu na podporu elektřiny z podporovaných zdrojů energie (POZE) bereme menší hodnotu z určení dle jističe nebo dle spotřeby. Vzhledem k velikosti našeho jističe, budeme určovat cenu POZE dle spotřeby (což se nám vyplatí do spotřeby 1,09 MWh/měsíc, resp. 13,14 MWh/rok).

V tabulce 5.2 vidíme, že zhruba 70 % ceny elektřiny při mé spotřebě, tvoří cena za silovou elektřinu a její distribuci. Zbýlých 30 % tvoří různé poplatky od daně z elektřiny, podporu obnovitelných zdrojů, až po operátora trhu s elektřinou (OTE). Navíc je zde vidět složení ceny elektrické energie při daných spotřebách naší malé linky.

	Sn42Bi58		SAC305	
	[Kč]	[%]	[Kč]	[%]
Distribuční sazba	3595,14	26,1	5172,92	28,4
Měsíční poplatek za odběrné místo	1188,00	8,6	1188,00	6,5
Daň z elektřiny	60,96	0,4	87,71	0,5
Cena silové elektřiny	5256,66	38,1	7563,62	41,5
Cena za jistič	2376,00	17,2	2376,00	13,0
POZE	1066,26	7,7	1534,21	8,4
systémové služby	164,12	1,2	236,14	1,3
OTE	83,16	0,6	83,16	0,5
celkem	13790,30	100	18241,78	100

Tabulka 5.2: Tabulka ročního složení ceny energie při použití pasty Sn42Bi58 a SAC305.



Obrázek 5.1: Složení ceny energie potřebné při pájení přetavením za použití pasty Sn42Bi58.

Jak je vidět v tabulce 5.3, náklady můžeme rozdělit na fixní a variabilní. Jelikož v našem případě budou fixní náklady stejné, výsledný rozdíl bude zapříčiněn pouze rozdílnými variabilními náklady, které jsou ovlivněny množstvím spotřebované energie v kWh. Největší podíl na variabilních nákladech budou mít cena silové elektřiny a distribuční sazba za její distribuci.

Do fixních nákladů řadíme měsíční poplatek za odběrné místo, poplatek za rezervovaný výkon (cena za jistič) a poplatek OTE. U velké výrovni linky, kde by spotřeba elektrické energie byla vyšší než 13,14 MWh/rok, by do fixních nákladů patřil i poplatek POZE.

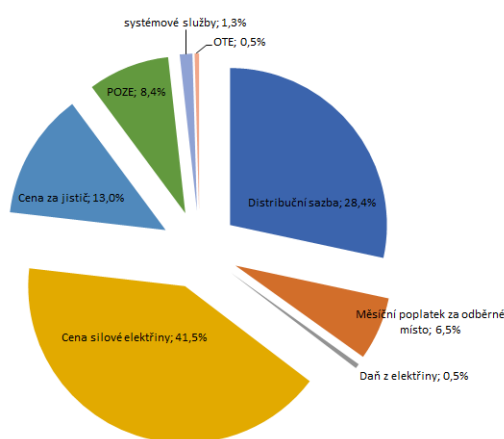
$$FN = 12 \cdot 99 + 12 \cdot 198 + 12 \cdot 6,93 = 3647,16Kč$$

$$VN_{SAC} = 3,9 \cdot (1669 + 28,3 + 2440,34 + 495 + 76,19) = 14594,62Kč$$

$$VN_{SnBi} = 2,15 \cdot (1669 + 28,3 + 2440,34 + 495 + 76,19) = 10143,14Kč$$

	Sn42Bi58	SAC305
	cena [Kč]	cena [Kč]
Fixní náklady	3 647,16	3 647,16
Variabilní náklady	10 143,14	14 594,62
Celkové náklady	13 790,30	18 241,78

Tabulka 5.3: Tabulka porovnání fixních a variabilních nákladů.



Obrázek 5.2: Složení ceny energie potřebné při pájení přetavením za použití pasty SAC305.

Roční spotřeba elektrické energie je při použití bismutové nízkotavicí pájky menší zhruba o 30 % oproti použití pasty SAC305. To se promítne stejným poměrem i na snížení variabilních nákladů za energii. Ovšem započteme-li fixní náklady a porovnáme náklady celkové, zjistíme, že při použití bismutové pájky snížíme roční celkové náklady zhruba o 24 %.

5.2 Náklady na materiál (pastu)

Problémem ovšem je, že ceny mnou zvolených pájek jsou různé a tedy při velkosériové výrobě rozdíl v nákladech na nákup materiálů (past), převýší rozdíl v nákladech za energii a namísto snížení celkových nákladů začne docházet ke zvyšování. Dalším předpokladem je, že pájecí pasty budeme v obou případech nanášet stejné množství na desku. Cenu klasické bezolovnaté pasty SAC305 budeme brát jako 4597,84 Kč/kg [26] a cenu nízko tavitelné Sn42Bi58 pasty budeme brát jako 4869,22 Kč/kg [27].

Bismutová pasta má větší pořizovací náklady zhruba o 5 % než SAC pasta, ovšem rozdíl nákladů za spotřebu elektrické energie je menší o 24 %. Použití bismutové pasty může být jedním ze způsobů snížení celkových nákladů na výrobu osazené DPS.

V našem případě se ovšem projeví velikost naší linky, u které činí rozdíl ušetřené energie pouze 0,94 MWh při použití nízkotavitelné bismutové pasty. Celkově tedy na energiích v řeči peněz ušetříme 4451,48 Kč. Nyní provedu následující výpočet.

$$\Delta N_{SnBi} = 0,7 \cdot 252 \cdot 271,38 = 47871,43 \text{ Kč}$$

Přenásobením celkového množství pájecí pasty spotřebovaného za jeden rok (množství pasty spotřebované za den přenásobené počtem pracovních dní) rozdílem ceny pájecích past jsem určila, o kolik se zvýší náklady na pořízení pasty, budeme-li pořizovat nízkotavitelnou Sn42Bi58 pastu.

ΔN_E [Kč] (energie)	-4 451,48
ΔN_{SnBi} [Kč] (pořizovací náklady)	47 871,43
ΔN_{E+SnBi} [Kč] (celkové dodatečné náklady)	43 419,95

Tabulka 5.4: Rozdíl nákladů při pořízení SnBi pasty namísto SAC pasty bez zohlednění zmetkovitosti.

Předchzí tabulka ukazuje, že pořízením bismutové pasty budeme mít roční dodatečné náklady ve výši 43419,95Kč, tedy namísto žádané úspory dojde k jevu opačnému. Naneštěstí, tato tabulka je neúplná a dochází zde k zanedbání dalšího důležitého vstupu.

5.3 Zmetkovitost

Při běžné výrobě dochází k různým výrobním vadám, díky čemuž vznikají nepoužitelné výrobky, tzv. zmetky. Snížením zmetkovitosti můžeme také snížit celkové výrobní náklady na jednotku, v našem případě na osazenou a zapájenou DPS. V rámci zajištění kvality výroby a snížení zmetkovitosti porovnáme zmetkovitost výroby při použití mnou zkoumaných past.

V rámci experimentu jsem provedla na referenčních DPS zkoušku stříhové síly, kdy jsem určila spodní hranici spolehlivé pevnosti pájeného spoje. Veškeré naměřené hodnoty stříhové síly pod touto hranicí považuji za zmetky.

		Hranice pro zmetky [%]	Spodní hranice stříhové síly [N]	Počet zmetků na 21 ks [ks]	Procentuálně:
Průměr stříhové síly [N] pro SAC:	67,54	10	60,78	6	28,57 %
Průměr stříhové síly [N] pro BiSn:	88,97	10	80,08	4	19,05 %

Tabulka 5.5: Tabulka měření zmetkovitosti.

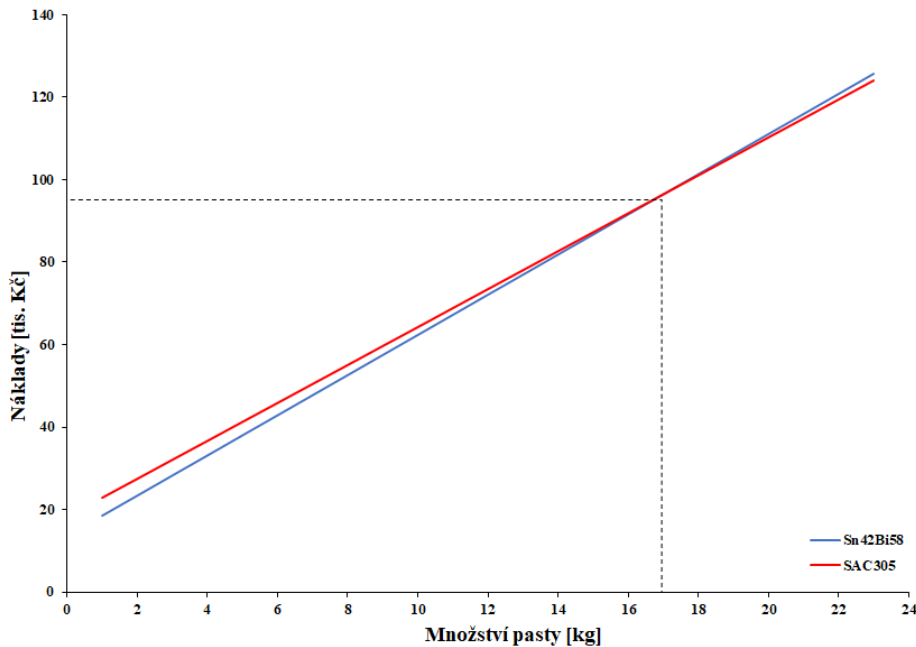
V tabulce 5.4 vidíme, že při zkoumání zmetkovitosti pájecí pasty SAC305 a Sn42Bi58 jsem dostala lepší výsledky pro nízkotavitelnou bismutovou pastu. Zmetkovitost pro tuto pastu byla o zhruba 9 % menší, než zmetkovitost při použití pasty SAC.

V závislosti na výsledcích mého experimentálního měření lze tvrdit, že použitím nízkotavitelné pasty můžeme snížit počet zmetků a zároveň zvýšit efektivnost výroby. Tím pádem dojde ke snížení celkových nákladů na vyrobenou jednotku, protože vyhozením jedné DPS (zmetku) můžeme přijít zhruba o 387 Kč (15 €, příklad opravy základní desky mobilního telefonu, převzato z [7]). Tuto hodnotu použijeme v následujících výpočtech).

Samozřejmě se jedná pouze o simulaci zmetkovitosti na základě dostupných prostředků na naší katedře elektrotechnologie. V praxi by zmetkovitost mohla dopadnout jinak. Hlavně by nás zajímala jiná veličina, než mechanická pevnost a to tepelná odolnost a množství zničených okolních součástí vlivem tepelného namáhání během opravy. To je u SAC, jenž potřebuje vyšší teplotu, mnohem větší a tudíž riziko zničených součástí vyšší.

5.4 Celkové provozní náklady

Při použití pasty SnBi budeme mít na každém pořízeném kile větší náklady na materiál o 271,38 Kč. Vzhledem k relativně nízké spotřebě pece Mistral 260, kterou jsem využívala v rámci měření spotřeby elektrické energie, se nám vyplatí používat bismutovou pastu pouze do spotřeby 16 kg. Při vyšší spotřebě pasty rozdíl nákladů na pořízení bismutové pasty převýší rozdíl nákladů na ušetřené energii. Daný průběh nákladů můžeme pozorovat na obrázku 5.3, ve kterém je i vyznačen bod, za kterým už nedochází k úspoře nákladů při použití SnBi pasty, ale naopak dochází k nárůstu nákladů.



Obrázek 5.3: Graf znázorňující růst nákladů v závislosti na roční spotřebě pájecí pasty.

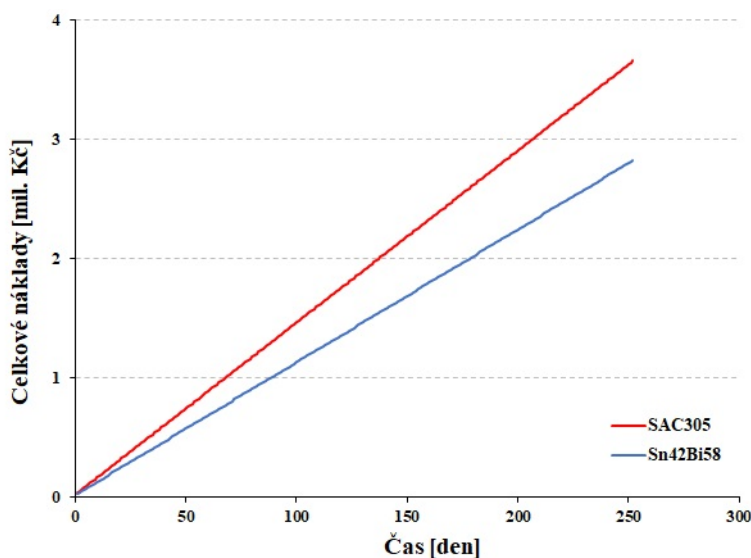
5. Ekonomické zhodnocení bezolovnatých past

Když však do celkových provozních nákladů zahrneme nejen pořizovací cenu pasty, energie ale i zmetkovitost pak se dopracujeme k odlišným výsledkům. Všechny předchozí výsledky byly neuplné a rozhodování podle nich by s největší pravděpodobností vedlo ke špatnému manažerskému rozhodnutí.

Naše malá linka je určena především k opravám větších DPS, na nichž jsou připájeny velké vývody součástek a pro jejich opravu je nutné použít větší množství pasty. Konkrétně tedy předpokládáme spotřebu zhruba 7 g pasty na jednu DPS. Celkovou spotřebu pasty na den odhadujeme na 700 g. Jednoduchým výpočtem jsem zjistila, že za jeden pracovní den (osmi hodinová směna) se osadí 100 DPS.

$$n_{osaz} = 700/7 = 100DPS$$

Z experimentálního měření zmetkovitosti vím, že při použití SAC pasty mám zhruba 28,57 % zmetkovitost, kdežto u bismutové pasty se zmetkovitost blíží 19,05 %. Jak již bylo zmíněno výše, náklady na vyhozenou destičku (zmetek) jsou ve výši 387 Kč/kus. Denně tedy vyrobíme 29 zmetků při použití SAC pasty, respektive 20 při použití bismutové pasty. Denní náklady na zmetky tedy činí 11223Kč u SAC pasty a 7740Kč u bismutové pasty.



Obrázek 5.4: Celkové provozní náklady obou past rozložené v čase.

Z grafu celkových provozních nákladů v závislosti na čase (obrázek 5.4) jasně vidíme, že při zohlednění zmetkovitosti, vítězí bismutová pasta nad SAC pastou, i přes vyšší pořizovací náklady bismutové pasty. Za rok provozu linky (252 dní) se použitím bismutové pasty ušetří zhruba 0,8 milionu Kč.

ΔN_E [Kč]	-4 451,48
ΔN_{SnBi} [Kč]	47 871,43
$\Delta N_{zmetkovitost}$ [Kč]	-877 716,00
ΔN [Kč]	-834 296,05

Tabulka 5.6: Tabulka celkové změny nákladů při zohlednění všech aspektů.

Tabulka 5.6 je kompletní tabulkou změn nákladů při pořízení bismutové pasty pro naši výrobu namísto klasické SAC pasty. Z této tabulky jasně vidíme, že většinu ušetřených nákladů tvoří menší zmetkovitost než u klasické pasty SAC. Dále je z tabulky jasně patrné, že ne vždy je všechno levnější skutečně levné a že i o 5 % větší investice může v konečném důsledku přinést 22% úsporu.

5.5 Citlivostní analýza

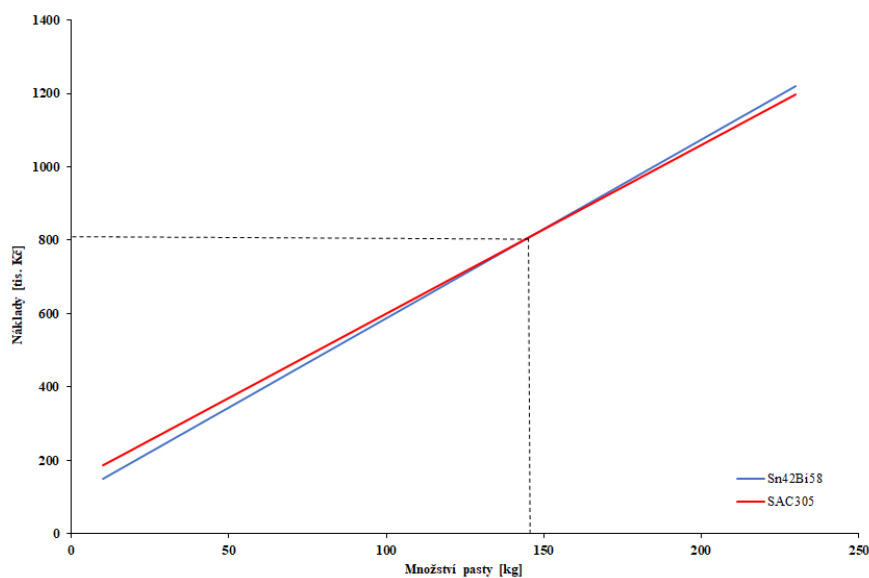
Celá ekonomická část se zabývá malým podnikem, s malou pecí, která má nízkou spotřebu elektrické energie. Náš podnik se dále zabývá opravami DPS, tedy je výhodné pro něj používat nízkotavitelnou pastu, jelikož již osazené součástky na DPS jsou vystavovány mnohem nižším teplotám při pájení, než při použití klasické SAC pasty a tím se také značně snižuje riziko dodatečného poškození jiných součástek.

Provedu-li citlivostní analýzu, kdy budu předpokládat velký podnik zaměřený na osazování DPS s 10x větší spotřebou elektrické energie a zároveň s 10x větší výrobou dostávám následující hodnoty:

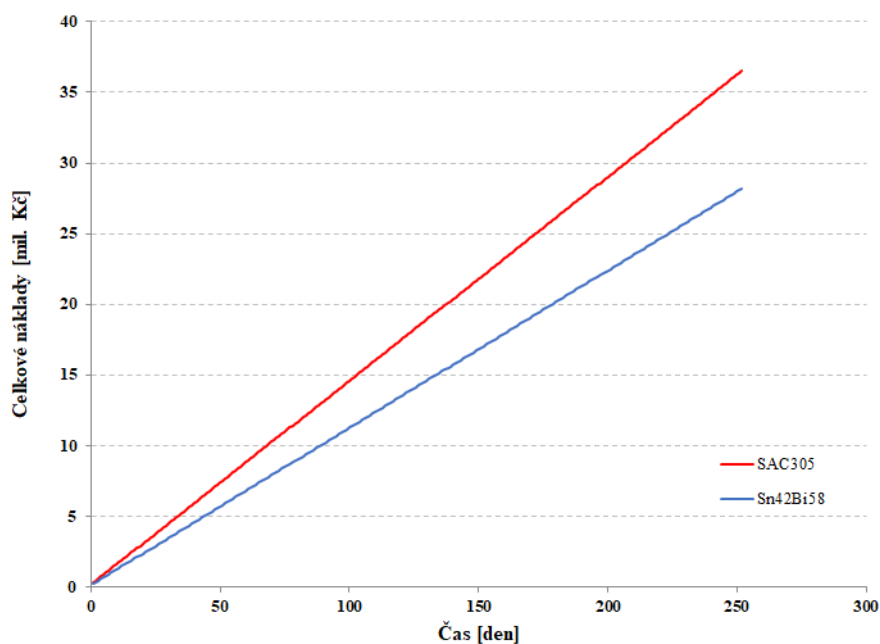
ΔN_E [Kč]	-39 835,38
ΔN_{SnBi} [Kč]	478 714,32
$\Delta N_{zmetkovitost}$ [Kč]	-8 777 160,00
ΔN [Kč]	-8 338 281,06

Tabulka 5.7: Tabulka celkové změny nákladů při citlivostní analýze zvýšení spotřeba el. energie 10x a výroby 10x.

5. Ekonomické zhodnocení bezolovnatých past



Obrázek 5.5: Graf znázorňující růst nákladů v závislosti na roční spotřebě pájecí pasty při desetinásobné spotřebě.



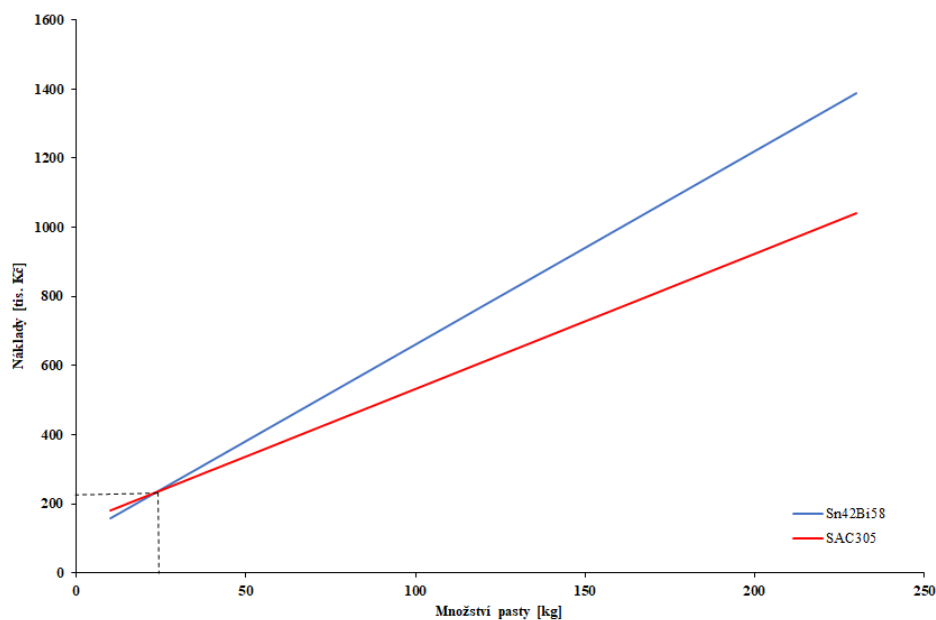
Obrázek 5.6: Celkové provozní náklady obou past rozložené v čase při desetinásobné výrobě a spotřebě.

Z předcházejících grafů je patrné, že celkové náklady nejsou citlivé na změnu výroby a změnu spotřeby elektrické energie. Je tomu proto, že velkou většinu nákladů tvoří náklady na zmetky.

Nyní se podíváme, co se stane když by došlo ke změně na trhu s pájecími pastami a dodavatel by snížil cenu SAC pasty o 15 % a naopak zvýšil cenu SnBi pasty o 15 %

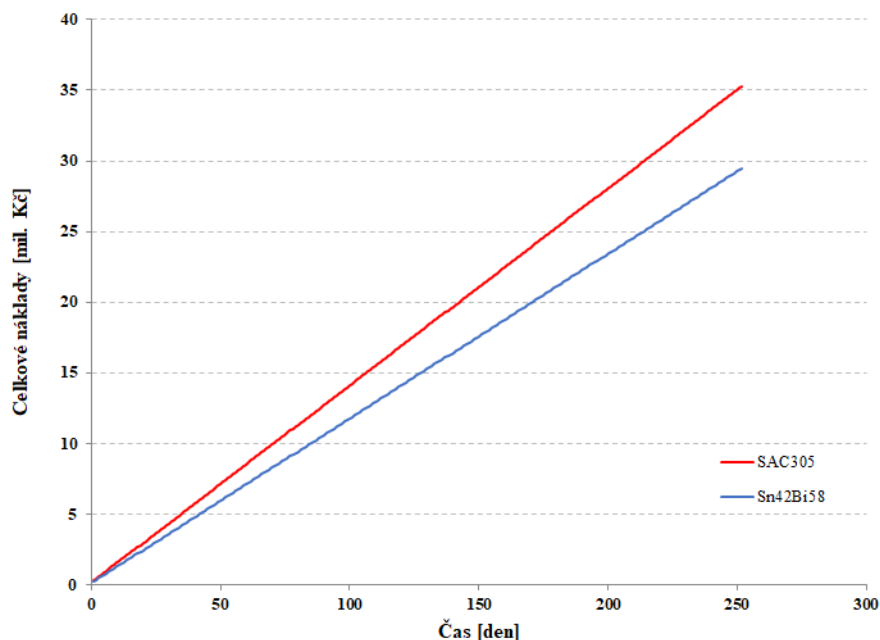
ΔN_E [Kč]	-39 835,38
ΔN_{SnBi} [Kč]	2 983 698,39
$\Delta N_{zmetkovitost}$ [Kč]	-8 777 160,00
ΔN [Kč]	-5 833 296,98

Tabulka 5.8: Tabulka celkové změny nákladů při citlivostní analýze zvýšení spotřeba el. energie 10x a výroby 10x.



Obrázek 5.7: Graf znázorňující růst nákladů v závislosti na roční spotřebě pájecí pasty při desetinásobné spotřebě a změně cen pájecích past.

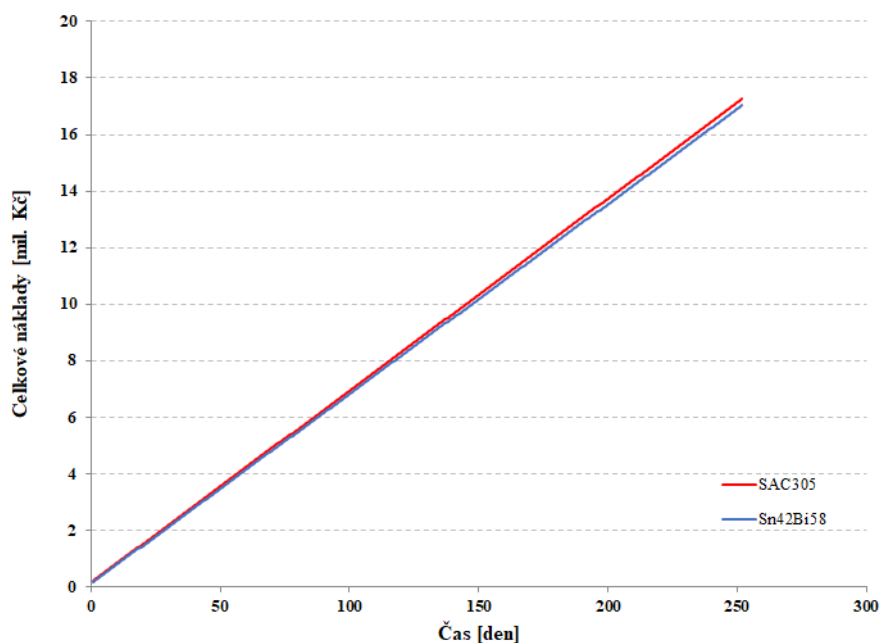
5. Ekonomické zhodnocení bezolovnatých past



Obrázek 5.8: Celkové provozní náklady obou past rozložené v čase při desetinásobné výrobě a spotřebě a změně cen pájecích past.

I v tomto případě je patrné, že při změně na trhu s pájecími pastami, kdy dojde ke slevnění SAC pasty a zdražení SnBi pasty, dochází pouze k mírnému snížení celkových ušetřených provozních nákladů. Předpokládám pouze tuto možnost pohybu cen na trhu, jelikož opačný jev, tedy snížení ceny bismutové pasty a zvýšení ceny SAC pasty by naopak vedlo ke zvětšení ušetřených nákladů.

Poslední možností je snížení nákladů na vyrobeny zmetek. To může být například následky masovější výroby, snížení ceny technologií nebo materiálů. Náklady na vyrobený zmetek v tomto případě budeme brát 140Kč.



Obrázek 5.9: Celkové provozní náklady obou past rozložené v čase při deseti násobné výrobě a spotřebě, změně cen pájecích past a snížení nákladů na zmetky.

Zde je vidět, že i při extrémním snížení nákladů na vyrobené zmetky, bude stejně výhodnější používat bismutovou pastu. Je to zapříčiněno tím, že v tomto případě, kdy uvažují mnohonásobně větší podnik se mnohem více projeví ušetřené náklady na energiích.

5.6 Zhodnocení ekonomické části

Je zcela jasné, že při posuzování dvou substitutů z hlediska ekonomické výhodnosti musíme brát v potaz všechny vlastnosti daných substitutů a důsledky jejich použití. Při zanedbání některého důsledku by mohlo dojít k mylnému rozhodnutí.

Konkrétně v mé teoretické provozovně, pakliže bych rozhodovala o použití SAC pasty nebo bismutové pasty pouze na základě ušetřených energií a nákladů na pořízení pasty, zcela jistě bych se rozhodla ve všech zmíněných případech pro SAC pastu, jelikož by daná provozovna měla vždy větší roční spotřebu pasty než 16 kg, resp. 147 kg, resp. 24 kg. Tedy v konečném důsledku

5. Ekonomické zhodnocení bezolovnatých past

bych provedla špatné rozhodnutí, jelikož bych zanedbala nejdůležitější část nákladů spojenou s použitím dané pasty.

Pro správné rozhodnutí, jak již bylo řečeno, musím zohlednit a vzít v potaz všechny důsledky použití dané pasty. Konkrétně v našem případě tedy musím zohlednit úspory na energiích, dodatečné náklady na koupi pasty a náklady na zmetkovitost. Při zohlednění těchto tří věcí, se v každém uvedeném příkladu zcela jistě a bez váhání rozhodnu pro použití bismutové nízkotavitelné pasty.

Vrátím-li se zpět, k mému malému podniku zaměřenému na opravy, je zde i další věc, kterou bych měla zohlednit a to je možnost poškození již zapájených funkčních součástek, vystavením vysokým teplotám při přetavení SAC pasty. Použitím nízkotavitelné bismutové pasty budou dané součástky vystaveny mnohem nižší teplotě a tedy i riziko jejich poškození se sníží. Tím se předejde dalším dodatečným nákladům na opravách.

Kapitola 6

Závěr

Vzhledem k tomu, že v dnešní době je pájení přetavením nejběžnějším způsobem pájení v elektrotechnice, je zkoumání vlivu nastavení pece, popřípadě změn v kvalitě pájeného spoje způsobených tímto nastavením, stále aktuální a důležité.

Pro první experiment se potvrdila má hypotéza, že nastavení pece nelze reprezentovat jen heating factorem. Mechanické a elektrické vlastnosti nevyšly až tak rozdílné pro ekvivalentní heating factory, ale vliv nastavení pece se jasně projevil v růstu intermetalické vrstvy. Což se teď na zkouškách nemuselo projevit, ale mohlo by se to později objevit po elektrickém, tepelném a mechanickém zatížení a vyzkoušení pájeného spoje jako skrytá vada. Tudíž pokud se rozhodneme měnit celý teplotní profil, včetně předehřevu, pak heating factor nelze použít jako predikci růstu IMC vrstvy. Dále jsme zjistili, že tavidlo RMA obsažené v pastě pro profily A až D, tvoří lepší podmínky pro růst IMC vrstvy, která roste dramaticky i pro relativně malé heating factory. Což v případě vyšší teploty v oblasti přetavení, může zhoršovat kvalitu pájeného spoje.

V druhém experimentu se po vyloučení vlivu předehřevu prokázalo, že pro ekvivalentní heating factory je růst IMC vrstvy stejný. Zvolila jsem tentokrát větší rozdíl teplot v oblasti přetavení a tím i výsledky byly prokazatelnější. Zjistila jsem, že i při dodržení předepsaného profilu výrobcem se mohou objevovat chyby v pájeném spoji, například zvýšený výskyt voidů, které vznikly tím, že tavidlo se nestačilo celé vypařit z pájeného spoje. Což se zrovna projevilo u našeho profilu E, který měl být ekvivalentním k profilu F, u kterého jsem tuto chybovost nezaznamenala. Navíc došlo ke změnám projevujícím se i na mechanické zkoušce zcela průkazně. Z toho plyne, že se heating factor dá použít jako predikce růstu IMC vrstvy, ale už se nedá

použít jako predikce kvality pájeného spoje. To potvrzuje moji hypotézu, že na nastavení pece a na tom jakým způsobem heating factor vzniká záleží, protože to má vliv na kvalitu vznikajícího pájeného spoje.

Dalším překvapivým výsledkem mých experimentů je, že se nedá napsat souhrnná rovnice, která by popisovala růst tloušťky IMC vrstvy v závislosti na heating factoru pro konkrétní slitinu (v našem případě Bi58Sn42), protože záleží i na obsahu a druhu tavidla obsaženého v pájecí pastě.

Stále nám však zůstává několik neznámých, které je potřeba do budoucna vyzkoumat. Například by bylo vhodné oba experimenty provést pro obě pájecí pasty, abychom mohli zhodnotit, jak tavidlo ovlivnilo výsledky. Dále neznáme dlouhodobé chování pájených spojů pájených při různém nastavení pece. To by se dalo ověřit zkouškou životnosti pomocí klimatických testů. Navíc jsem zjistila, že pro různá tavidla nám IMC vrstva roste s různou strmostí. Takže by bylo vhodné provést experimenty pro pasty s různými tavidly a zhodnotit závislost trendu růstu IMC vrstvy s heating factorem na typu použitého tavidla. Všechna tato témata mohou být předmětem dalšího zkoumání v mé diplomové práci.

Ekonomickou stránku projektu jsem zhodnotila tak, že v dnešní době by se nízkotavitelná bezolovnatá pájka BiSn vyplatila v malém provozu oproti klasické bezolovnaté SAC pájce pouze do určitého objemu výroby. Když však do projektu zahrneme i zmetkovitost, pak se i u takhle malého provozu jednoznačně projeví výhody BiSn pasty, i přesto, že úspory na energiích nejsou tak razantní. Avšak má data jsou zkreslena tím, že jsem počítala s výrobou v menší peci a tedy i menším provozem, určeným hlavně pro opravy. Pokud bych počítala náklady pro velkou linku s větší pecí, jejíž spotřeba by byla mnohonásobně větší, pak by i úspory na energiích byly dramatičtější. Největší výhodu BiSn pasty jsem však nevzala v potaz ve své kalkulaci, jelikož ji v našich podmínkách neumíme nasimulovat. Tou je totiž fakt, že pro přetavování potřebuje daleko menší teplotu, tudíž nejen že ušetříme energie (to v kalkulaci zahrnuto je), ale nedochází k poškození součástek vlivem vysokých teplot. Obecně se dá tedy říct, že se rozhodně vyplatí investovat do nízkotavitelných bezolovnatých pájecích past. Což ostatně prokazuje i moje ekonomická analýza.

Naměřené výsledky v experimentální části této bakalářské práce byly prezentovány na odborné konferenci ISSE 2019 ve Wroclawi v článku Evaluation of Bismuth/Tin Solder Intermetallic Layers Based on Heating Factor, autoři

jsou Petr Veselý, Karel Dušek a Angelika Staňková, předpokládané vydání publikace je v červnu 2019.

Příloha A

Literatura

- [1] P. Mach, V. Skočil, and J. Urbánek, *Montáž v elektronice: Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 1.vyd., Praha, 2001, ISBN 80-01-02392-3.
- [2] A. Pietriková, J. Ďurišin, and P. Mach, *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 1. vyd., Košice, 2010, ISBN 978-80-553-0447-2.
- [3] J. Gao, Y. Wu, and H. Ding, “Optimization of a reflow soldering process based on the heating factor,” *Soldering & Surface*, vol. 19, no. 1, pp. 28–33, 2007.
- [4] P. Mach, “Pájení.” https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76879/mod_resource/content/1/P%C3%A1jen%C3%AD.pdf, 2017, dostupné 5.4.2019.
- [5] PAGGEN, “Mistral 260.” <https://www.paggenshop.com/Mistral-260-mit-38-Touchscreen-LEAD-FREE>, 2016, dostupné 29.3.2019.
- [6] PRINTTEC, “Conveyor reflow ovens.” https://printtec.nl/contents/en-uk/d410_Conveyor_Reflow_Ovens.html, 2017, dostupné 29.3.2019.
- [7] P. Veselý, “Risk analýza pájení čipu,” *Bakalářská práce, ČVUT v Praze*, Praha 2015.
- [8] P. S. Martin Adámek, Michal Nicák, “Moderní technologie elektronických obvodů a systémů, laboratorní cvičení – pájení,” dostupné 5.4.2019.

- [9] KIC, “Kic 2000 user manual.” <https://kicthermal.com/wp-content/uploads/2015/12/KIC-2000-v3000-User-Manual.pdf>, 2010, dostupné 5.4.2019.
- [10] V. Ježek, “Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje,” *Diplomová práce, VUT v Brně*, Brno 2015.
- [11] M. Lauko, “Pájecí slitiny a jejich vlastnosti,” *Diplomová práce, ČVUT v Praze*, Praha 2017.
- [12] M. Abel and V. Cimburek, *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. ABE.TEC, 1. vyd., Pardubice, 2005, ISBN 80-903597-0-1.
- [13] KOKI, “Složení pájecích past.” <http://www.koki.org/slozenipajecichpast.html>, 2019, dostupné 22.4.2019.
- [14] P. Veselý, “Příprava a návrh experimentu pro analýzu rozstříkovaní tavidla z pájecí pasty,” *Diplomová práce, ČVUT v Praze*, Praha 2017.
- [15] M. Slavata, “Možné chyby a kontrolní metody v elektrotechnické montáži,” *Bakalářská práce, ČVUT v Praze*, Praha 2014.
- [16] O. Renza, “Teplotní profil, růst intermetalických vrstev,” *Bakalářská práce, ČVUT v Praze*, Praha 2018.
- [17] M. Paško, “Analýza změn v pájených spojích vzniklých vlivem stárnutí,” *Diplomová práce, VUT v Brně*, Brno 2011.
- [18] J. Hintermuller, “Vliv teplotního profilu u pájení přetavením na tvorbu intermetalických vrstev,” *Bakalářská práce, ČVUT v Praze*, Praha 2018.
- [19] J. Meliš, “Mechanické vlastnosti pájeného spoje,” *Bakalářská práce, VUT v Brně*, Brno 2010.
- [20] L. Mach, “Vliv množství pájky a izotermálního stárnutí na vodivost pájeného spoje,” *Diplomová práce, VUT v Brně*, Brno 2012.
- [21] M. Hrabovský, “Výroba nanostruktur na grafitových/grafenových vrstvách a měření jejich transportních vlastností za pokojové teploty,” *Bakalářská práce, VUT v Brně*, Brno 2012.
- [22] P. Hartman, “Svařování hliníkových slitin metodou tig,” *Bakalářská práce, ČVUT v Praze*, Praha 2015.

- [23] P. Veselý, E. Horynová, J. Starý, D. Bušek, K. Dušek, V. Zahradník, M. Plaček, P. Mach, M. Kučírek, V. Ježek, and M. Dosedla, “Solder joint quality evaluation based on heating factor,” *Circuit World*, vol. 44, no. 1, pp. 37–44, 2018.
- [24] AMTECH, “Nc-31, no-clean solder paste.” <https://www.tme.eu/cz/Document/1fc95e28e194b4614677720ff422babe/nc-31.pdf>, 2015, dostupné 29.3.2019.
- [25] PRE, “Ceník elektřiny pro podnikatele.” <https://www.pre.cz/Files/firmy/elektrina/archiv-produktu/2019/universal-predi/?fbclid=IwAR1Yq7qyY6bQaBjdoYKqYJXHqZYaQpQXwZN3iq7vSsNtdEEzrR8-u3utxo0>, 2019, dostupné 10.4.2019.
- [26] T. E. Components, “Amtech lf-4300.” https://www.tme.eu/cz/details/asnagcun_500/solder-pastes-lead-free/amtech/lf-4300/?fbclid=IwAR0xjsycKpztvviy_EBMBQkZazTl8LDiCTsYGQ3YoUrx-Xj7TdN442yu4M, 2019, dostupné 10.4.2019.
- [27] T. E. Components, “Amtech nc-31.” https://www.tme.eu/cz/details/asnbin_500/solder-pastes-lead-free/amtech/nc-31/?fbclid=IwAR0-vzTnsoHjZAwJb3kyAzh1ACWLeqUD-Rjq48MHhP8z_rVELeeymadlsSs, 2019, dostupné 10.4.2019.