

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



**Termická analýza nízkotavitelné  
bezolovnaté pájecí slitiny**

**Thermal Analysis of Low-Temperature  
Lead-Free Solder Alloy**

**Bakalářská práce**  
Bachelor's thesis

**Anna Kadlecová**  
Praha 2020

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Petr Veselý

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kadlecová** Jméno: **Anna** Osobní číslo: **474774**  
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:

**Termická analýza nízkotavitelné bezolovnaté pájecí slitiny**

Název bakalářské práce anglicky:

**Thermal Analysis of Low-Temperature Lead-Free Solder Alloy**

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši na tématiku pájení v elektronice a elektrotechnice se zaměřením na používané slitiny. Seznamte se s měřením pomocí diferenciální skenovací kalorimetrie.
2. Proveďte termickou analýzu pájecí slitiny na bázi cínu a bismutu s vybraným třetím kovem s různým poměrem složek, určete teploty tání a tuhnutí.
3. Analyzujte mikrostrukturu a tvrdost vzorků.
4. Vyhodnoťte získaná data. Zhodnoťte využití analyzované slitiny v aplikační praxi.
5. Proveďte ekonomické porovnání investičních a provozních nákladů pro různé pájecí pece v akademickém prostředí.

Seznam doporučené literatury:

- [1] A. Pietriková, J. Ďurišin, and P. Mach, Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010.
- [2] P. Mach, V. Skočil, and J. Urbánek, Montáž v elektronice: pouzďení aktivních součástek, plošné spoje, Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [3] T.-K. Lee, Fundamentals of lead-free solder interconnect technology: from microstructures to reliability. New York: Springer, 2014.
- [4] J. Šesták, Měření termofyzikálních vlastností pevných látek: teoretická termická analýza, 1. Praha: Academia, 1982.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Petr Veselý, katedra elektrotechnologie FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **22.05.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **22.05.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2022**

Ing. Petr Veselý  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
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

## **Prohlášení**

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

V Praze, dne .....

.....

Anna Kadlecová

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala Ing. Petru Veselému za odborné vedení, poskytnuté rady a vstřícnost při konzultacích. Dále bych ráda poděkovala Ing. Michaele Makešové za pomoc v ekonomické části práce.

# Abstrakt

Tato práce se zabývá analýzou bezolovnaté pájecí slitiny na bázi cínu a bismutu s přidaným galliem. Práce je rozdělena na tři části. V první části jsou vysvětleny základní pojmy týkající se pájení a principy fázorových diagramů. Druhá část je věnována samotnému experimentu. Jsou zde vysvětleny metody všech provedených analýz – diferenciální skenovací kalorimetrie, Vickersova zkouška tvrdosti a skenovací elektronová mikroskopie. Následně je zde popsáno, jak jednotlivé analýzy probíhaly a jaké výsledky přinesly. Poslední část je část ekonomická, ve které jsou zhodnoceny a porovnány náklady na dvě pájecí zařízení, jejichž koupi zvažuje Katedra technologií.

## Klíčová slova

Bezolovnaté pájení, BiSnGa slitiny, diferenciální skenovací kalorimetrie, horkovzdušná přetavovací pec, skenovací elektronová mikroskopie, termická analýza, Vickersova zkouška tvrdosti, zařízení pro pájení v parách.

## Abstract

This thesis deals with the analysis of lead-free solder alloy based on tin and bismuth with added gallium. The thesis is divided into three parts. The first part explains the basic concepts of soldering and the principles of phasor diagrams. The second part is devoted to the experiment itself. There are explained methods of all performed analyzes – differential scanning calorimetry, Vickers hardness test and scanning electron microscopy. Subsequently, there is described how the individual analyzes proceeded and what the results brought. The last part is the economic part, in which the costs of two soldering equipment are calculated and compared.

## Keywords

BiSnGa solders, differential scanning calorimetry, hot air remelting furnace, lead-free soldering, scanning electron microscopy, thermal analysis, vapor soldering equipment, Vickers hardness method.

# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| Úvod .....  | 8         |
| <b>1 Teoretická úvodní část.....</b>                      | <b>9</b>  |
| 1.1 Pájení.....   | 9         |
| 1.1.1 Hromadné pájení .....                               | 10        |
| 1.1.1.1 Pájení tekutou pájkou.....                        | 10        |
| 1.1.1.2 Pájení přetavením.....                            | 11        |
| 1.1.2 Tavidla .....                                       | 13        |
| 1.1.3 Pájky.....  | 13        |
| 1.1.3.1 Vlastnosti prvků v pájkách.....                   | 14        |
| 1.1.3.2 Olovnaté pájky .....                              | 14        |
| 1.1.3.3 Bezolovnaté pájky.....                            | 15        |
| 1.1.3.3.1 Dvousložkové bezolovnaté pájky .....            | 15        |
| 1.1.3.3.2 Třísložkové bezolovnaté pájky .....             | 16        |
| 1.2 Fázorové diagramy.....                                | 17        |
| 1.2.1 Binární diagram.....                                | 18        |
| 1.2.2 Ternární diagram.....                               | 19        |
| 1.2.3 Pseudobinární diagram.....                          | 20        |
| <b>2 Experimentální část .....</b>                        | <b>21</b> |
| 2.1 Cíl experimentu.....                                  | 21        |
| 2.2 Průběh experimentu .....                              | 21        |
| 2.2.1 Zkoumané materiály.....                             | 21        |
| 2.2.2 Diferenciální skenovací kalorimetrie .....          | 22        |
| 2.2.3 Vickersova zkouška tvrdosti .....                   | 25        |
| 2.2.4 Skenovací elektronová mikroskopie .....             | 26        |
| 2.3 Výsledky experimentu .....                            | 27        |
| 2.3.1 Termická analýza .....                              | 27        |
| 2.3.2 Měření tvrdosti .....                               | 30        |
| 2.3.3 Analýza struktury.....                              | 32        |
| 2.4 Diskuze a závěr experimentu .....                     | 37        |
| <b>3 Ekonomická část .....</b>                            | <b>39</b> |
| 3.1 Cíl ekonomické části.....                             | 39        |
| 3.2 Údaje o porovnávaných pájecích zařízeních.....        | 39        |
| 3.2.1 Přetavovací pec Mistral 260.....                    | 39        |
| 3.2.2 Pájecí zařízení pro pájení v parách ATF VP 400..... | 40        |
| 3.3 Výpočet nákladů.....                                  | 41        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.3.1    | Investiční náklady .....                             | 41        |
| 3.3.1.1  | Čistá současná hodnota NPV .....                     | 41        |
| 3.3.1.2  | Roční ekvivalentní peněžní tok .....                 | 42        |
| 3.3.1.3  | Vyčíslení investičních nákladů.....                  | 42        |
| 3.3.2    | Provozní náklady.....                                | 42        |
| 3.3.2.1  | Náklady na materiál .....                            | 43        |
| 3.3.2.2  | Náklady na elektřinu .....                           | 44        |
| 3.3.2.3  | Osobní náklady.....                                  | 45        |
| 3.3.2.4  | Náklady na revizi, údržbu a opravu .....             | 46        |
| 3.4      | Celkové náklady pecí za jejich dobu životnosti ..... | 47        |
| 3.5      | Citlivostní analýza nákladů .....                    | 49        |
| 3.5.1    | Změna investičních nákladů.....                      | 49        |
| 3.5.2    | Citlivostní analýza na dotovaná zařízení.....        | 50        |
| <b>4</b> | <b>Závěr práce.....</b>                              | <b>52</b> |
|          | <b>Zdroje.....</b>                                   | <b>55</b> |
|          | <b>Seznam obrázků .....</b>                          | <b>58</b> |
|          | <b>Seznam tabulek .....</b>                          | <b>58</b> |
|          | <b>Seznam grafů.....</b>                             | <b>59</b> |
|          | <b>Přílohy.....</b>                                  | <b>59</b> |

# Úvod

Cílem této bakalářské práce je zanalyzovat vybranou bezolovnatou pájecí slitinu na bázi cínu a bismutu s přidáním třetím kovem, galliem, s různým poměrem složek. Práce se skládá ze tří částí – části teoretické, experimentální a ekonomické.

Teoretická část je věnována především tématice pájení. Jsou zde popsány typy pájení – pájení tekutou pájkou a pájení přetavením, přičemž jsou v pájení tekutou pájkou popsány tři způsoby pájení, mezi něž patří pájení vlnou, pájení vlečením a pájení ponorem. V kapitole o pájení přetavením jsou vysvětleny různé typy ohřevu: infračervenými zářiči, laserem, horkým plynem, kondenzací par a vedením tepla. Následně jsou v teoretické části zmíněna tavidla pro pájení, jejich funkce a základní rozdělení. Třetí podkapitola pájení je věnována vlastnostem olovnatých a bezolovnatých slitin. Slitiny bezolovnaté jsou dále děleny na dvousložkové a tříložkové, ve kterých jsou popsány nejvýznamnější zástupci těchto pájek. Nakonec je zde popsáno užití a vlastnosti fázových diagramů (binárních a ternárních) a jejich konstrukce.

Druhá část projektu – experimentální část – popisuje cíl prováděného výzkumu, jeho postup a vyvozené závěry. Analýza vytvořených slitin na bázi cínu, bismutu a gallia je provedena z termického pohledu a z pohledu tvrdosti. Procentuální zastoupení jednotlivých složek pájecích slitin je následně ověřeno pomocí elektronového mikroskopu. Pomocí elektronového mikroskopu je též posouzena mikrostruktura a rozpustnost jednotlivých složek sloučenin. Termická analýza neboli určení teploty tání a tuhnutí je realizována pomocí diferenčního skenovacího kalorimetru, jehož funkce a použití je v této části popsáno. Tvrdost vzorků je zkoumána na mikrotvrdoměru pomocí Vickersovy zkoušky. Princip této zkoušky je též vysvětlen v jedné z kapitol. V závěru experimentální části jsou shrnuty a prodiskutovány výsledky analýzy, tedy jak přidané gallium ovlivňuje vlastnosti vytvořených slitin. Současně je uvedeno, k čemu jsou dané závěry užitečné a pro jaké účely by se daná slitina v budoucnu mohla teoreticky využívat.

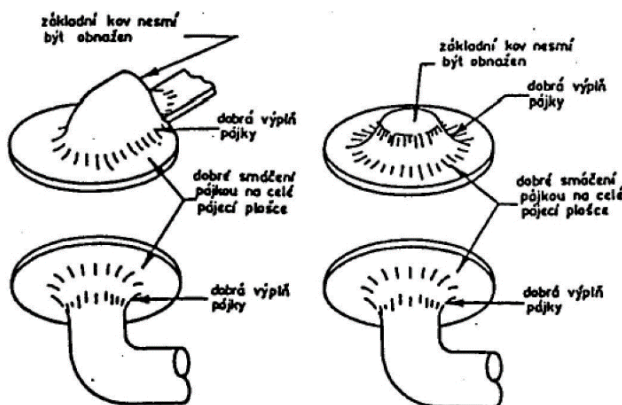
V poslední části, části ekonomické, jsou představeny dva typy pájecích strojů, jejichž koupi zvažuje Katedra elektrotechnologie. Na tyto pájecí stroje jsou následně vypočítány náklady na pořízení, materiál, elektřinu, revizi, čištění, opravu a osobní náklady. Z celkových nákladů je poté vypočítána čistá současná hodnota a roční ekvivalentní peněžní tok. Vzhledem k tomu, že na každé peci se očekává odlišný počet provedených experimentů, je vypočítán také náklad na jeden experiment. Tato hodnota je pro závěrečné posouzení mnohem směřodatnější. Na základě vyčíslení celkových nákladů a dalších aspektů, jakožto potenciální přínos ve formě možných experimentů pro katedru, bylo prodiskutováno, které pájecí zařízení je pro katedru vhodnější. Protože je výše nákladů ovlivněna změnou vstupních parametrů, jako je například výše diskontu a inflace, je provedena citlivostní analýza, ve které jsou uvedeny scénáře, které by teoreticky mohly nastat, pokud se změní některý ze vstupních parametrů.



# 1 Teoretická úvodní část

## 1.1 Pájení

Pod pojmem pájení si můžeme představit způsob, jak metalurgicky spojit kovové nebo pokovené součástky roztavenou pájkou, jejíž teplota musí být vždy nižší než teplota tání spojovaných ploch. Samotný proces pájení je nejvíce ovlivněn kvalitou smáčení pájených povrchů roztavenou pájkou, teplotou tavení pájecí slitiny a správným množstvím pájky. Ideální množství pájky poznáme podle toho, pakliže jsou pod pájkou jasně viditelné obrysy vodiče a povrch pájky je v kolmém řezu dutý. Při pájení dochází ke vzájemnému rozpuštění a mísení částic pájky a spájeného materiálu. Výsledkem tohoto procesu je pájený spoj – metalurgický spoj, který má funkci elektrického a mechanického spojení dvou anebo více kovových či pokovených částí. Povrch takového spoje musí být hladký, lesklý, nepřerušovaný a na jeho okrajích musí být zřejmý ostrý úhel smáčení, jehož velikost nesmí přesahovat  $15^\circ$  [1, 2].



Obrázek 1. Správné provedení pájených spojů [1]

Při pájení mohou vzniknout různé pájené spoje – bezdifúzní, difúzní s rozpuštěním a disperzní. Bezdifúzní pájený spoj je spoj vzniklý předčasným ukončením ohřevu během tvorby chemických vazeb. Difúzní pájený spoj s rozpuštěním se objeví při delším smáčení plochy tekutou pájkou během difúze a rozpuštění. Rozpuštění závisí na typu výchozího materiálu a může být omezené, neomezené, nebo se tvoří eutektické slitiny. Disperzní pájený spoj je typický pro kovy, které se mezi sebou omezeně chemicky váží a netvoří slitiny, např. wolfram – měď, železo – olovo. Během pájení vtékají složky, které jsou snadněji tavitelné, do mikroskopických kapilár v tuhém tělese a tím vytváří pevné spojení. Kvůli snížené volné povrchové energii tuhého tělesa se jeho částice rozptylují v pájce [3].

Během pájení vznikají difúze, na rozhraní pájky a pájeného substrátu, intermetalické sloučeniny. Jejich vznik je nezbytný pro tvorbu kvalitního a pevného spoje. Pokud je však intermetalická vrstva příliš široká, může to vytvořený spoj znehodnotit – spoj má vyšší rezistivitu

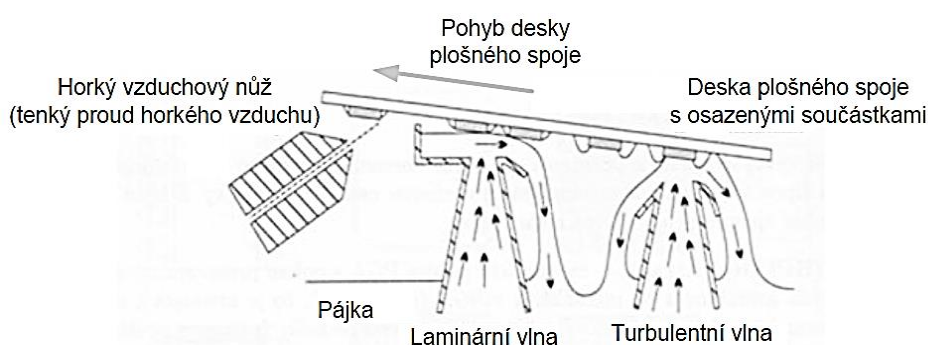
a menší tepelnou vodivost. Navíc může spoj podléhat vyšší křehkosti. Všechny tyto aspekty negativně ovlivní jeho životnost [2].

Pájení můžeme dělit podle různých hledisek. Podle teploty tání pájky rozlišujeme pájení měkké (do 450 °C) a tvrdé (nad 450 °C). S měkkým pájením se můžeme setkat především v elektronice a elektrotechnice a tvrdé pájení se používá ve strojírenství jako alternativa svařování. V současné době převažuje hromadné (strojní) pájení, a to díky přesnosti a rychlosti procesu [1]. Hromadné pájení v elektronice můžeme dělit na základě metody pájení na pájení tekutou pájkou a pájení přetavením. V následujících kapitolách jsou tyto metody stručně popsány.

## 1.1.1 Hromadné pájení

### 1.1.1.1 Pájení tekutou pájkou

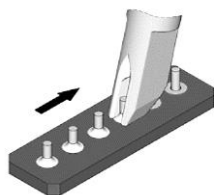
V této metodě rozlišujeme tři druhy – pájení vlnou, pájení vlečením a pájení ponorem. Pájení vlnou je jako jediné vyhovující pro povrchovou montáž součástek. Pájka zahřátá na teplotu 240–260 °C se zde nachází v kontejneru, ve kterém vytváří vlny. Tyto vlny následně smáčí spodní stranu desky plošného spoje s přilepenými součástkami, a tím se zapájí potřebná místa. Plochy, které zapájet nepožadujeme, jsou ochráněny nepájivou vrstvou. Pájení obvykle probíhá dvouvlnově. První vlna, vlna turbulentní, podporuje funkci tavidla, zbavuje povrch nežádoucích nečistot a usnadňuje smáčivost povrchu. Druhá vlna se nazývá laminární. Tato vlna provede samotné homogenní zapájení spoje. Poté, co deska projde pod těmito vlnami, je očištěna tzv. horkým nožem, úzkým proudem vzduchu o vysoké teplotě (380 °C), který odstraní nadbytečnou pájku [4].



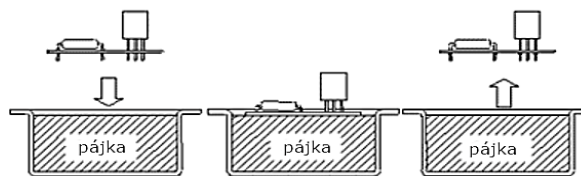
Obrázek 2. Dvouvlnové pájení [4]

Pájení vlečením je technika, která se používá při výrobě tištěných integrovaných obvodů desky plošných spojů s velkým počtem pinů. Spočívá v tažení pájecího hrotu přes více pinů desky najednou. Tento druh pájení se používá pouze okrajově [5].

Poslední technika – pájení ponorem, se stejně jako předchozí zmiňovaná technika používá pouze marginálně. U této techniky se součástka ponoří do lázně s roztavenou pájkou. Pájka je tak nanesena na všechna místa, která nejsou chráněna nepájkivou maskou [6–8].



Obrázek 3. Pájení vlečením [7]

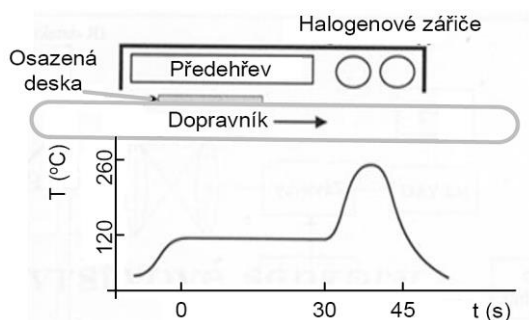


Obrázek 4. Pájení ponorem [8]

### 1.1.1.2 Pájení přetavením

Metoda pájení přetavením je aktuálně nepoužívanější metoda v hromadném pájení. Používá se hlavně v případech, kde by pájení vlnou způsobilo větší pravděpodobnost vzniku můstků mezi vedlejšími vývody. Zároveň tato metoda eliminuje lepení SMD<sup>1</sup> součástek a tím zvyšuje rychlost a kvalitu pájecího procesu. Proces pájení přetavením začíná nanesením pájecí pasty pomocí šablonového tisku, sítotisku nebo *dispenserem*<sup>2</sup>. Poté se pomocí osazovacího automatu osadí deska součástkami a nechá se usušit pasta. Tímto sušením, které obvykle probíhá při 120 °C, se odpaří kapalina v pastě a zároveň se aktivuje tavidlo. Samotný proces přetavení lze zprostředkovat několika typy ohřevu: infračervenými zářiči, laserem, horkým plynem, kondenzací par nebo vedením tepla [4]. Zvlášť probíhající sušení se dnes nahrazuje teplotním profilem v pájecí peci, který zahrnuje jak předehřev, tak i samotné přetavení.

Pro ohřev pomocí infračerveného záření se používá zářič s vlnovou délkou záření 0,8 – 400 μm. Dochází zde k nerovnoměrnému ohřevu desky kvůli nepředvídatelnému pohlcování a odrazu tohoto záření. To je způsobeno například vlivem barvy a drsnosti povrchu desky, směrem dopadání záření a mnoha dalšími činiteli. Následkem toho je nerovnoměrná kvalita u různých pájených spojů nebo může v pájené části vzniknout mechanické napětí [4].



Obrázek 5. Pájení ohřevem infračervenými zářiči [4]

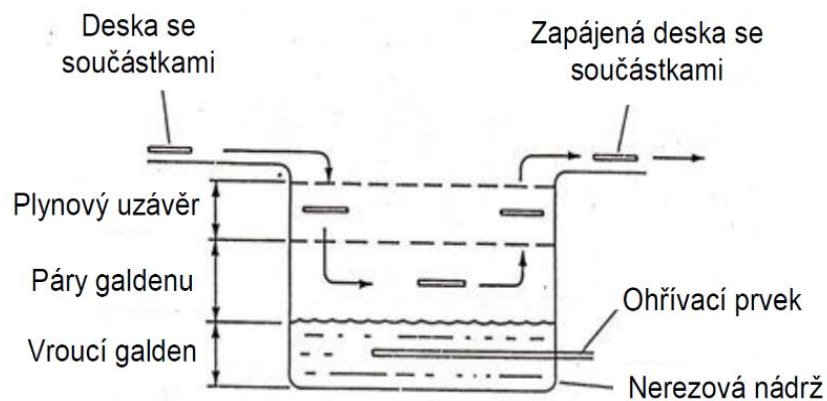
<sup>1</sup> Surface Mount Device – součástka pro povrchovou montáž.

<sup>2</sup> Dávkování určeného objemu pájecí pasty dutým hrotem.

Pájení horkým plynem je nejběžnějším typem pájení. Při tomto pájení prochází plyn, nejběžněji vzduch nebo dusík, ohřívacím aparátem a následně je tryskou usměrnován na žádané místo. Tepla nezbytné pro přetavení pájky je řízeno teplotou a rychlostí proudu plynu [4]. Tento typ ohřevu je nejrozšířenější a s horkovzdušnými průběžnými pecemi se můžeme běžně setkat v průmyslu. Hlavní výhodou této pece, která má jako zdroj tepla proudící vzduch cirkulující v celém prostoru pece, je konstantní výkon a možnost flexibilního nastavení dle velikosti a typu desek plošných spojů a součástek. Pece jsou navíc velmi spolehlivé a nenáročné na obsluhu [9].

Ohřev pomocí laseru je oproti předešlé technice používán hlavně pro speciální aplikace a běžně se s ním nesetkáme. Základem u ohřevu pomocí laseru je paprsek vystupující z válcového zdroje, který je pomocí optického vlákna připojen k optice. Jedna z hlavních funkcí vlákna je přetváření válcového paprsku na paprsek kuželový, který je fokusován do jednoho bodu, kde ohřeje a roztaví pájecí pastu. Pro správnou kvalitu spoje a dostatečné ohřátí pájené plochy je potřeba, aby byl vycházející světelný tok stejnosměrný. Samotný proces vytvoření spoje laserem je přesný a rychlý a využívá se pro pájení těžko dostupných míst. Tato varianta však není vhodná pro pájení celých osazených desek kvůli časové i finanční neefektivnosti [4, 10].

Během pájení v parách se předává teplo kondenzací par pracovní tekutiny. Pracovní kapalinou je galden, stabilní chemicky neagresivní dielektrická kapalina. Proces začíná tak, že se po spuštění ohřevu v parní komoře ve spodní části tanku zahřívá studený galden na bod varu. Z galdenu poté stoupají páry do horní části tanku, kde kondenzují na deskách plošných spojů s osazenými součástkami, a tím dojde k zapájení spojů. Dále se přivádí teplo pro vytvoření par, které následně zajistí přenos tepla do pájené soustavy [4].



Obrázek 6. Pájení ohřevem kondenzací par [4]

## 1.1.2 Tavidla

Tavidlo hraje v procesu pájení významnou roli – redukuje na povrchu pájené plochy oxidové vrstvy, které by mohly zabránit správnému smáčení pájky. Tavidlo musí tavený povrch dobře smáčet, chránit jej i pájku před další případnou oxidací a napomáhat roztékání pájky. Dále tavidlo ovlivňuje povrchové napětí pájky, tedy i zatékání pájky, a vznik pájecích můsteků a krápníků. Kvalitu tavidla hodnotíme podle tvorby spoje a případného poškození funkce vytvořeného spoje. V pájeném spoji by se neměly objevit chemicky agresivní a elektricky vodivé zbytky tavidel, a proto je často nutné tyto části po spájení odstranit pomocí různých rozpouštědel [1]. Tavidlo může mít pevnou, tuhou nebo pastovitou formu. V následující tabulce jsou uvedeny některé typy tavidel pro měkké pájení v elektronice [3].

| Typ tavidla | Základ tavidla      | Aktivátor  | Forma                          |
|-------------|---------------------|--|--------------------------------|
| pryskyřičná | kalafuna            | bez aktivátoru<br>halogenový aktivátor<br>nehalogenový aktivátor | roztok<br>pevná látka<br>pasta |
|             | umělá pryskyřice    |  |                                |
| organická   | vodou rozpustná     |  |                                |
|             | vodou nerozpustná   |  |                                |
| anorganická | soli                | s chloridem amonným  |                                |
|             |                     | bez chloridu amonného  |                                |
|             | kyseliny            | kyselina fosforečná  |                                |
|             |                     | jiná kyselina  |                                |
| zásady      | aminy a/nebo čpavek |  |                                |

Tabulka 1. Tavidla pro měkké pájení [3]

## 1.1.3 Pájky

Pro měkké pájení v elektronice se používají dvousložkové nebo tříložkové pájky, ve kterých jsou těžké kovy s nízkou teplotou tavení. Nejvíce se v pájkách používá cín, olovo a zinek. V některých případech obsahují pájky i bizmut, antimon, indium, stříbro, měď, nikl nebo železo. Nejrozšířenější jsou pájky cínové, dokáží se totiž spojit skoro se všemi kovy a mají četné využití v elektronice. V pájkách se samozřejmě kromě užitečných prvků vyskytují i prvky nechtěné – příměsi, které negativně působí na vlastnosti pájky. Ovlivňují jejich smáčivost, pevnost a pájitelnost. Nejvíce se příměsi do pájky dostanou během jejího používání. To se rapidně projeví například při strojním pájení, kdy se při rychlém pohybu pájky rozpouští nečistoty na povrchu. Pokud se během pájení rozpouští základní materiál, dochází k znečištění pájky, které může vést až k nutné výměně pájky. Znečištění můžou způsobovat i náhodné částice spadlé do lázně během pájení [3].

### 1.1.3.1 Vlastnosti prvků v pájkách

V této kapitole jsou shrnuty vlastnosti jednotlivých prvků v pájkách a jejich nepříznivé vlivy. Pokud obsah mědi ve slitině převyšuje desetinu procenta, výrazně se zhorší roztékavost a následně je pájka hrubozrnná, tvrdá a lámavá. Železo a kadmium při koncentraci nad setinu procenta přivodí pájce „pískovou“ strukturu, a tím se stávají spoje lámavé a porézní. Zlato vyvolá zrnitost a křehkost a při nadbytku arsenu se stejně jako u niklu tvoří útvary ve formě puchýřků. Dovolenu pracovní teplotu snižuje bizmut. Při obsahu hliníku nad půl setiny procenta a zinku nad tisícinu procenta je pájka špatně tekutá a na povrchu se vytvářejí mapovité struktury. Nadbytek stříbra zatmaví povrch pájky a udělá jej méně lesklý [3].

Existuje mnoho typů pájek, které se dle odlišných hledisek dělí do různých skupin. V této práci se zaměříme na pájky používané v oblasti elektrotechniky. V minulosti se v těchto pájkách používala zejména slitina olovo-cín. Používání olova v hromadném pájení je však dle ustanovení Evropské komise zdraví škodlivé. Z tohoto důvodu je olovo nahrazováno cínem, který se kombinuje s řadou ušlechtilých a vzácných kovů – mědí, stříbrem, bismutem, zinkem, niklem, indiem nebo zlatem.

Přidáme-li do cínové pájky stříbro, zvýší se její tvrdost a její teplota tání se naopak sníží. Sn-Ag pájky navíc poskytují relativně velkou smáčecí sílu. Negativní aspekt této pájky je však vyšší cena stříbra. Tento problém se dá vyřešit výměnou stříbra za levnější prvek zinek, přičemž má vzniklá pájka podobnou teplotu tání jako Sn-Ag pájka. Nevýhodou u zinkové pájky je snazší oxidace pájených spojů a špatné smáčení, a to i s použitím velmi aktivního tavidla [11].

Další možností náhrady olova v pájce je bizmut. Zatímco teplota tání u mnohých bezolovnatých pájek přesahuje teplotu 200 °C, bizmut má schopnost snížit teplotu tání v pájce na hodnotu okolo 140 °C. Z toho důvodu jsou bizmut-cínové slitiny vhodné pro pájení elektronických komponentů (např. desky plošných spojů, polovodičové čipy), které jsou náchylné na vysoké teplo a mohou být jednodušeji poškozeny [12].

Z předešlých odstavců je zřejmé, že cín-bizmutová pájka je pro pájení velmi vhodná. Nicméně stále svými vlastnostmi nedokáže zcela nahradit pájky olovnaté. Z tohoto důvodu se používají slitiny na bázi cínu a bismutu, do kterých se pro zlepšení vlastností přidává třetí prvek. Tato práce je zaměřena na to, jak můžou být vylepšeny vlastnosti cín-bizmutové slitiny díky přidanému třetímu prvku – galliu.

### 1.1.3.2 Olovnaté pájky

Jak již bylo zmíněno, olovnaté pájecí slitiny jsou již v hromadném pájení kvůli své toxicitě dle směrnice Evropské Unie WEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment directive) a RoHS platné od roku 2006 (Restriction of Hazardous Substances directive) zakázány, výjimkou je oblast vojenské techniky a medicíny [13]. Vlastnosti olova jsou pro pájení velmi

důležité. Společně s cínem tvoří olovo ideální sloučeninu s ideálními mechanickými i elektrickými vlastnostmi a nízkou teplotou tání. Nejvýznamnější cín-olovnatá pájka je 63Sn37Pb. V tomto poměru je totiž pájka *eutektikem*<sup>3</sup> s teplotou tání a zároveň tuhnutí 183 °C. Tím je dosaženo vysoké efektivity a kvality pájení [2].

### 1.1.3.3 Bezolovnaté pájky

Bezolovnaté pájecí slitiny vykazují jiné vlastnosti nežli slitiny na bázi olova. Mají horší smáčivost a vyšší teplotu tání, což může vést k poškození součástek vlivem nadměrného ohřátí. Tyto pájky jsou tedy obecně omezené maximální přípustnou teplotou součástek, tepelným gradientem na součástkách, specifikací tavidla, smáčením kontaktů součástek a pájených plošek DPS<sup>4</sup>, povrchovou úpravou kontaktů součástek a pájených plošek DPS, maximální přípustnou teplotou laminátu DPS, delaminačními problémy mezi laminátem a ploškami a problémy životnosti pájených spojů [2]. Proto bezolovnaté slitiny prochází neustálým vývojem, aby se vyrovnaly svými vlastnostmi pájkách olovnatým. Vlastnosti některých bezolovnatých pájek si shrneme v následujících kapitolách.

#### 1.1.3.3.1 Dvousložkové bezolovnaté pájky

Dvousložkové bezolovnaté pájky se používají v průmyslu již mnoho let. Jsou to nejjednodušší typy pájek, které mají široké využití ve všech typech pájení. V *Tabulce 2.* jsou uvedeny zástupci nejpoužívanějších bezolovnatých dvojsložkových pájek s charakteristickými teplotami tavení.

| Pájecí slitina | Teplota tání (°C) |
|----------------|-------------------|
| Sn3,5Ag        | 221               |
| Sn0,7Cu        | 227               |
| Sn5Sb          | 232–240           |
| Sn9Zn          | 199               |
| Sn58Bi         | 138               |
| Sn52In         | 118               |

*Tabulka 2. Dvojsložkové bezolovnaté pájky [14]*

<sup>3</sup> Slitina, která má teplotu tavení identickou s teplotou tuhnutí – eutektická teplota.

<sup>4</sup> Deska plošných spojů.

Slitina Sn<sub>3,5</sub>Ag je slitinou eutektickou, která je dobře odolná vůči *filet liftingu*<sup>5</sup>. Po ztuhnutí se v pájce nachází částice sloučeniny Ag<sub>3</sub>Sn vytvářející vnitřní pnutí. Pokud pájku umístíme do ochranné atmosféry N<sub>2</sub>, má tato pájecí slitina stejnou smáčecí schopnost jako běžná olovnatá slitina. Tato pájka má však nižší tepelnou vodivost, což zhoršuje odvod ztrátového tepla [14, 15].

Eutektická pájka Sn<sub>0,7</sub>Cu je navzdory své vysoké teplotě tání (227 °C) doporučena pro pájení vlnou. Ze všech bezolovnatých pájecích slitin je tato slitina nejlevnější a využívá se v technologii pájení *flip – chip*<sup>6</sup>. Její pevnost tahu je nižší než u konvenční olovnaté pájky Sn<sub>37</sub>Pb, ale dosahuje většího prodloužení a srovnatelné pevnosti ve smyku [14, 15].

Životnost u pájecí slitiny Sn<sub>5</sub>Sb je výrazně vyšší v porovnání s olovnatou pájkou Sn<sub>63</sub>Pb. Avšak tato pájka je limitována svou potřebnou pracovní teplotou, která se pohybuje kolem 290°C. Další nevýhoda u této slitiny je určitá toxicita antimonu [15].

Hlavní výhodou pájecí slitiny Sn<sub>9</sub>Zn oproti pájce Sn<sub>63</sub>Pb je vyšší tahová pevnost a nižší povrchové napětí, což zajišťuje lepší smáčivost povrchů pájkou. Negativní faktor této pájky je vyšší tendence k oxidaci a ke korozi. Navíc přítomnost zinku ve slitině může zapříčinit křehkost pájky [14].

Pájka Bi<sub>58</sub>Sn<sub>42</sub> je eutektická slitina s nízkou teplotou tání (138 °C). Nízká teplota tání předchází vysokému tepelnému namáhání desky a součástek. Využívá se pro pájení v elektronice a telekomunikaci. S výhodou se též používá v opravárenském průmyslu. Pokud se do této slitiny přidá olovo, vznikne slitina s teplotou tání 96 °C, která může ohrozit spolehlivost spojení. Tento případ může nastat, pokud pro pájení touto pájkou budeme používat substrát s olovnatou povrchovou úpravou [14].

Poslední zmíněná pájecí slitina Sn<sub>52</sub>In je též eutektická slitina s nízkou teplotou tání (118 °C). Tato slitina se však pro běžné užití nehodí a to kvůli nízké dostupnosti indiu a vysoké ceně pájky [14].

### 1.1.3.3.2 Třísložkové bezolovnaté pájky

Třísložkové bezolovnaté pájecí slitiny mají v průmyslu též důležité místo. Díky kombinaci tří kovů lze dosáhnout požadovaných vlastností pájky. Nejužívanější třísložkové bezolovnaté pájky s typickými teplotami tání jsou uvedeny v *Tabulce 3*.

Slitiny na bázi cínu, stříbra a mědi – SnAgCu jsou v současné době nejvyužívanější bezolovnaté pájecí slitiny v elektronické výrobě a lze je použít i v technologiích *flip – chip*. Velkou výhodou je vysoká únavová odolnost materiálu vytvořeného spoje, a to díky rozptýleným částicím Ag<sub>3</sub>Sn a Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, které brání šíření dislokací. Správné smáčení těchto pájek vyžaduje

<sup>5</sup> Oddělení pájky od měděné podložky, ke kterému dochází během ochlazování po procesu pájení.

<sup>6</sup> Připojování čipů v převrácené poloze.



speciální tavidlo. Nevýhodná je také vysoká pořizovací cena stříbra. Investice se však vyplatí, protože pájky mají větší pevnost ve smyku, odolnost vůči tečení a vytvořené spoje mají delší životnost [14, 15].

Výhodou pájek na bázi SnAgBi je snižování povrchové energie. Tato pájka má také zvýšenou únavovou odolnost a odolnost vůči odtrhnutí spoje od pájené desky při jeho chladnutí. Tyto výhody plynou z bismutu obsaženého ve sloučenině. Bismut však při obsahu vyšším než 5 % způsobuje horší tvárnost pájky [14].

Pájecí slitiny typu SnZnBi a SnAgIn se využívají hlavně díky své nízké teplotě tání. Můžou se tedy využít v aplikacích, kde by vysoké teploty poškodily strukturu připojovaných součástek. Pájky, které obsahují zinek, podléhají rychlejší oxidaci. Z tohoto důvodu nemohou být dlouhodobě udržovány v tekutém stavu. Tuto negativní vlastnost zinku do určité míry zeslabuje ve sloučeninách bismut [14].

| Pájecí slitina                           | Teplota tání (°C) |
|--|-------------------|
| Sn <sub>3,8</sub> Ag <sub>0,7</sub> Cu   | 217               |
| Sn <sub>3,1</sub> Ag <sub>1,5</sub> Cu   | 217               |
| Sn <sub>3,5</sub> Ag <sub>0,75</sub> Cu  | 218               |
| Sn <sub>3</sub> Ag <sub>0,5</sub> Cu     | 220               |
| Sn <sub>3,3</sub> Ag <sub>4,7</sub> Bi   | 219–220           |
| Sn <sub>3,5</sub> Ag <sub>1</sub> Bi     | 210–215           |
| Sn <sub>1,5</sub> Ag <sub>6</sub> Bi     | 188–230           |
| Sn <sub>2,8</sub> Ag <sub>20</sub> In    | 178               |
| Sn <sub>4,75</sub> Cu <sub>0,25</sub> Se | 210–217           |
| Sn <sub>8</sub> Zn <sub>3</sub> Bi       | 193               |

Tabulka 3. Třísloužkové bezolovnaté pájky [14]

## 1.2 Fázorové diagramy

Fázorový rovnovážný diagram slouží ke grafickému znázornění existence dvou a více fází ve slitině v libovolné kombinaci teplot a poměru složek. Díky těmto diagramům máme přehled o mísitelnosti a teplotě tání jednotlivých složek slitiny. Diagramy jsou zhotovovány pro děje izobarické (při konstantním tlaku), přičemž je tlak roven tlaku atmosférickému. Na svislé ose diagramu se nachází teplota děje a vodorovná osa udává procentuální poměr složek směsi. V diagramech jsou znázorněny teploty tání a tuhnutí slitin v závislosti na jejich složení [2, 16].

V diagramech jsou pro nás nejvýznamnější křivky, které popisují úplné roztavení či ztuhnutí slitiny. Tyto křivky se nazývají křivky likvidu a solidu. Tuhnutí neboli krystalizace slitiny nastává, když se snižuje teplota slitiny, která předtím byla na křivce likvidu, do té doby,

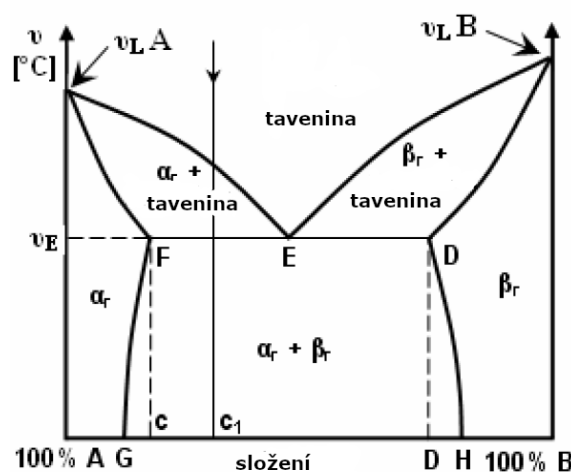
dokud se teplota nerovná teplotě solidu. Pod teplotou solidu je již proces tuhnutí ukončen a slitina je tvořena krystaly tuhého roztoku. Další křivky v diagramu udávají počty stupňů volnosti, rovnovážné složení koexistujících fází a jejich rovnovážné množství [16, 17].

## 1.2.1 Binární diagram

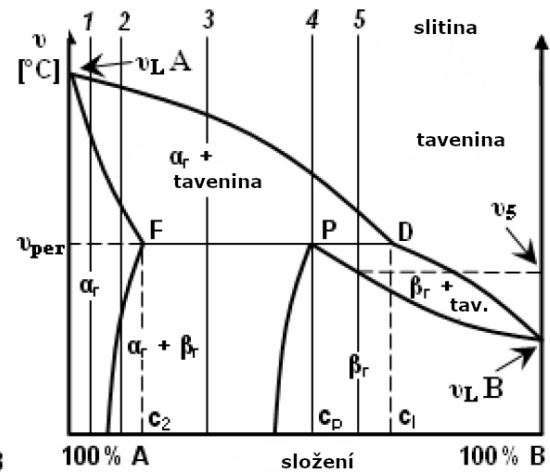
Binární diagram je určen pro dvousložkové sloučeniny. Na základě povahy obou analyzovaných složkových kovů, lze diagramy rozdělit na tři základní skupiny [2]:

- Kovy A a B jsou v tuhém i v tekutém stavu navzájem dokonale rozpustné (např. systém CuAu, CuNi, AuNi).
- Kovy A a B jsou navzájem dokonale rozpustné pouze v tekutém stavu, v tuhém stavu jsou navzájem dokonale nerozpustné.
- Kovy A a B jsou navzájem dokonale rozpustné pouze v tekutém stavu, v tuhém stavu jsou navzájem rozpustné jen omezeně (např. systém SnAg, SnCu, SnNi, CuAg).

V bezolovnatém pájení se používají pájecí slitiny, které mají omezenou rozpustnost v tuhém stavu. Pro tyto slitiny platí, že v případě, kdy mají oba kovy A a B srovnatelné teploty tání, bude fázový diagram vykazovat eutektické minimum. Když je však tato teplota značně rozdílná, bude ve sloučenině docházet s největší pravděpodobností k peritektické přeměně – dojde k reakci taveniny jednoho z kovů s nižší teplotou tání se směsnými krystaly druhého kovu, přičemž se vytvoří krystaly nového typu. Tyto typy diagramů jsou pro ilustraci na *Obrázku 7* a *Obrázku 8*.



Obrázek 7. Eutektický typ diagramu [2]

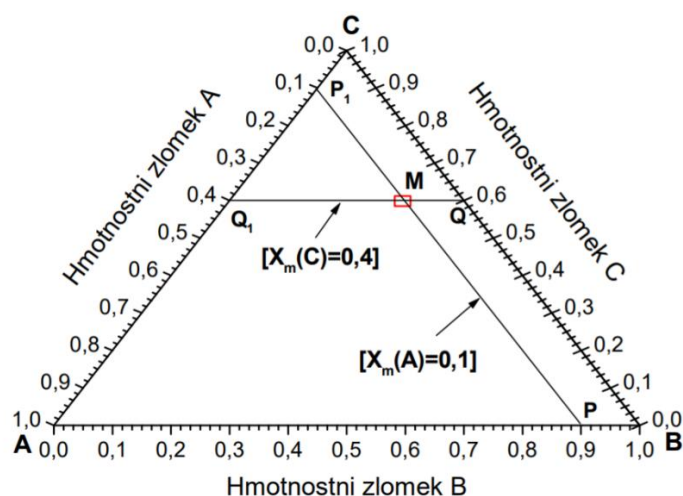


Obrázek 8. Peritektický typ diagramu [2]

V obou diagramech si můžeme všimnout šesti fází – taveniny,  $\alpha_r$ ,  $\alpha_r + \text{tavenina}$ ,  $\beta_r$ ,  $\beta_r + \text{tavenina}$ ,  $\alpha_r + \beta_r$ . Symbol  $\alpha_r$  značí primární roztok kovu B a kovu A v tuhém stavu. Opačně značíme tento tuhý roztok symbolem  $\beta_r$  [2].

## 1.2.2 Ternární diagram

Ternární diagram je určen pro sloučeniny tvořené třemi prvky, kovy A, B a C. Přestože jde o tříložkový systém, který na základě Gibbsova fázového pravidla vyžaduje čtyřrozměrné zobrazení, lze slitinový diagram díky zavedení konstantního tlaku sestavit ve třírozměrném provedení. Tlak totiž nijak výrazně neovlivňuje rovnovážné poměry složek, a proto ho lze považovat za neměnný. Diagram se sestavuje ve tvaru trojbokého hranolu s rovnostranným trojúhelníkem jako základnou. Protože je však tento typ diagramu náročný na sestavení a nepřehledný, upřednostňuje se zobrazení ve dvojrozměrné prostoru, které se realizuje

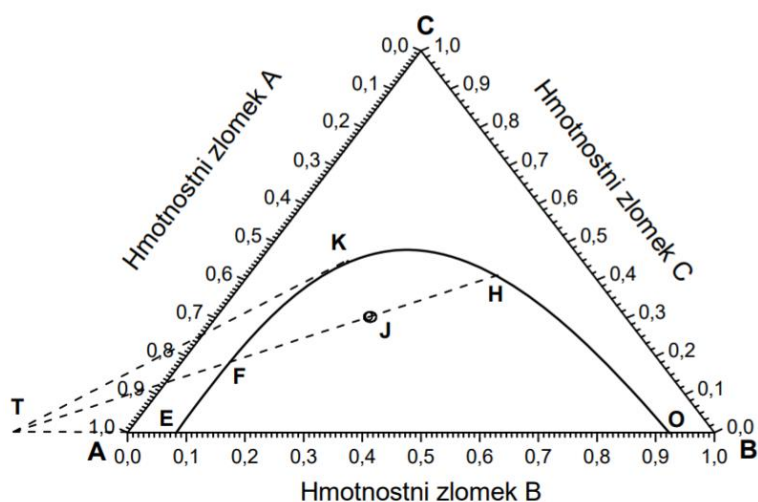


Obrázek 9. Ternární diagram v trojúhelníkovém provedení pro ternární směs M [19]

izotermním řezem hranolového diagramu ve vodorovném směru. Vznikne tak diagram ve tvaru rovnostranného trojúhelníku. Příklad takového diagramu je znázorněn na *Obrázku 9*. Vrcholy trojúhelníku A, B a C zastupují jednotlivé prvky, strany trojúhelníka A-B, B-C, C-A znázorňují binární podsystemy s různou procentuální koncentrací složek a plocha trojúhelníku představuje ternární podsystem A-B-C. Z diagramu můžeme takto při určité konstantní teplotě odečíst konkrétní fázi slitiny [18].

Na každé straně trojúhelníku je znázorněno molární či hmotnostní zastoupení vždy jedné složky z binárního podsystemu. Zastoupení druhé složky se vypočítá díky podmínce, podle které je součet obou složek v podsystemu roven jedné (100 %). Přímkou, která je rovnoběžná s určitou stranou, znázorňuje konstantní obsah složky umístěné na vrcholu proti této přímce. Příkladem je přímkou  $P_1MP$ , kde je konstantní obsah složky A (0,1 ~ 10 %), a přímkou  $Q_1MQ$  s konstantním obsahem složky C (0,6 ~ 60 %). Vzniklý bod M reprezentuje ternární směs se zastoupením směsí A, B, C v poměru 0,1:0,3:0,6 [19].

Jestliže prvky mezi sebou interagují, soustava se rozdělí na dvě fáze, je tedy heterogenní. Struktura obou fází je poté dána jedním hmotnostním zlomkem. Rovnováha fází je učena křivkou EFKHO, která se nazývá binodální – znázorněno na *Obrázku 10* [19].



*Obrázek 10. Rovnováha dvou fází v ternárním systému [19]*

Křivka protíná stranu trojúhelníku AB v bodech E a O. Tyto body definují rovnovážné složení binárních fází. Pod křivkou se nachází koexistenční oblast dvou kapalných fází. Pokud je vytvořena tříprvková směs se složením určeným bodem J, který se nachází pod binodální křivkou, rozpadne se tento systém na dvě fáze. Rovnovážné složení těchto fází je určeno body F a H. Body F a H spojují přímky konody. Hmotnost fází je poté určena vztahem [19]:

$$m_F \cdot |FJ| = m_H \cdot |FH|, \quad (1)$$

kde  $m_F$  a  $m_H$  představují hmotnost příslušných fází,  $|FJ|$  a  $|FH|$  jsou délky úseček v diagramu. Množství obou fází lze určit z rovnice látkové bilance [19]:

$$m_J = m_F + m_H \quad (2)$$

Prodloužíme-li jednotlivé konody a protilehlou stranu trojúhelníku, protnou se v bodě T. Vzniklý bod K ležící na binodální křivce je kritickým bodem, ve kterém se obě koexistující fáze spojí [19].

### 1.2.3 Pseudobinární diagram

Pro zjednodušení zobrazení tříprvkové soustavy jsou ternární diagramy nahrazovány tzv. pseudobinárními diagramy, svíslými řezy trojrozměrného ternárního diagramu. Princip těchto diagramů spočívá v tom, že se mění procentuální zastoupení dvou složek a třetí složka systému je konstantní. V tomto diagramu se složení mění po úsečce, na jejíž koncích jsou měnící se složky. Fázové poměry jsou následně zobrazovány jako funkce teploty. Princip sestavení je obdobný jako u binárního diagramu – viz kapitola *Binární diagramy* [20].

## 2 Experimentální část

### 2.1 Cíl experimentu

Cílem tohoto projektu je analyzovat vybrané pájecí slitiny, a to z hlediska teplot fázových změn (teplot tání a tuhnutí), z hlediska tvrdosti slitin a z hlediska mikrostruktury. Ověření procentuálního zastoupení prvků je provedeno pomocí elektronového mikroskopu. Naměřené hodnoty jsou následně srovnány s hodnotami tabulkovými, je provedena diskuze a na základě toho vyvozen závěr. V diskuzi jsou rozebrány nejen rozdíly naměřených a tabulkových hodnot, ale i využití těchto hodnot v praktické aplikaci. Analyzuje se bezolovnatá tříprvková pájecí slitina s různým poměrem procentuálního zastoupení jednotlivých prvků, která má díky svému složení potenciál na uplatnění v měkkém pájení. Analyzovaná slitina se skládá z bismutu, cínu a gallia, přičemž je analyzováno pateré procentuální složení, a to Bi59Sn40Ga1, Bi57Sn40Ga3, Bi50Sn40Ga10, Bi30Sn40Ga30 a Bi10Sn40Ga50. V závěru experimentální práce je též zhotoven pseudobinární fázový diagram, aby bylo přehledněji vidět, jak odlišné zastoupení gallia a bismutu slitinu ovlivňuje. Tento diagram lze stanovit díky konstantnímu zastoupení cínu, jehož procento zůstává na 40 %. Slitina nepatří mezi doposud používané, a proto nejsou její vlastnosti v literaturách detailně popsány. Bližšímu popisu těchto vlastností můžou přispět výsledky analýzy z této práce.

### 2.2 Průběh experimentu

Jak již bylo zmíněno, analýza pájecí slitiny BiSnGa je provedena trojím způsobem. Nejdříve je realizována z termického hlediska. Jako první jsou zjištěny teploty tání a tuhnutí samotných prvků sloučenin, tedy bismutu a cínu, a eutektické slitiny Bi58Sn42, se kterou je analyzovaná slitina s přidaným galliem porovnávána. Teplota tání gallia změřena není, neboť je tato teplota velmi nízká. Takto nízké teploty není možné měřit bez aktivního chlazení přístroje, které nebylo k dispozici. Teploty tání a tuhnutí jsou následně změřeny u zkoumané slitiny s různým zastoupením gallia a bismutu Bi59Sn40Ga1, Bi57Sn40Ga3, Bi50Sn40Ga10, Bi30Sn40Ga30 a Bi10Sn40Ga50. Z těchto hodnot je následně sestrojen zjednodušený fázový pseudobinární diagram. Dále se všechny zmiňované vzorky podrobily Vickersově zkoušce tvrdosti. Nakonec je pomocí elektronového mikroskopu přezkoumaná mikrostruktura zhotovených slitin a je ověřeno procentuální zastoupení všech prvků.

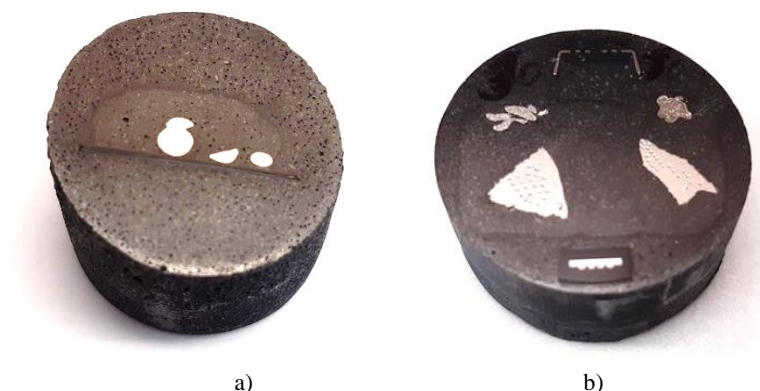
#### 2.2.1 Zkoumané materiály

Eutektická slitina Bi58Sn42 a slitiny s nízkým zastoupením gallia 1 % a 3 % byly zhotoveny metalurgem katedry elektrotechnologie. Ostatní slitiny byly vytvořeny mnou.

Pro zhotovení slitin s předem stanoveným procentuálním zastoupením jednotlivých prvků bylo zapotřebí nejdřív z čistých kovů odštipnout kleštěmi potřebné množství, jenž bylo následně změřeno pomocí analytických vah. Poté byly odebrané kousky kovů po dobu jedné hodiny umístěny v kovové lázni, kde došlo k jejich roztavení a promíchání. Výsledná slitina se po vyjmutí z lázně nechala ztuhnout.

Do přístroje pro diferenciální skenovací kalimetrii lze umístit vzorky s velmi malou hmotností v řádu miligramů, aby se vešli do kalíšků. Malé hmotnosti bylo dosaženo tím, že se od větší části vyrobené ztuhlé slitiny odštipl kleštěmi malý kus, který se dále upravoval, dokud se nedosáhlo požadované velikosti a hmotnosti. Tato hmotnost byla ověřována na analytických vahách.

Aby mohly být jednotlivé vzorky podrobeny analýze mikrostruktury, musely být zhotoveny jejich výbrusy. Výroba takového výbrusu není zcela snadná. Nejprve se zkoumaný vzorek musí očist a vložit do speciální formy. Poté se zalije směsí zalévací dvousložkové pryskyřice s uhlíkovými sazemi, které zajistí vodivost. Po vytvrzení zalévací hmoty je vzorek na pile s diamantovým kotoučem postupně ořezáván, dokud se nenalezne ideální řez vzorku. Ten je poté pro zbavení se nerovností a rýh broušen a nakonec vyleštěn. V některých případech může být ještě výbrus podroben leptání, které slouží k vyvolání jeho mikrostruktury. Výbrusy, které byly zhotoveny pro analýzu v této práci jsou zobrazeny na *Obrázku 11*.



Obrázek 11. Výbrusy a)  $Bi_{58}Sn_{42}$ ,  $Bi_{59}Sn_{40}Ga_1$ ,  $Bi_{57}Sn_{40}Ga_3$  b)  $Bi_{50}Sn_{40}Ga_{10}$ ,  $Bi_{30}Sn_{40}Ga_{30}$

## 2.2.2 Diferenciální skenovací kalorimetrie

Termická analýza je provedena pomocí přístroje SETSYS Evolution TGA-DTA/DSC. Přístroj SETSYS Evolution TGA-DTA/DSC má mnoho funkcí. Například je navržen na studii oxidace/koroze kovů a slitin, reakce mezi materiálem a plynem, izotermní stability materiálů za určitých atmosfér, fázové přechody kovů a dalších. V tomto projektu je využita jeho funkcionalita měření fázových přechodů kovů, tedy pro analýzu DSC – diferenciální skenovací kalorimetrii [21].

Diferenční skenovací kalorimetrie spočívá v tom, že se podle nastaveného programu kontrolovaně mění teplota analyzovaného vzorku uvnitř měřícího kalíšku. V našem případě se jedná o keramický kalíšek a teplotu prázdného referenčního kalíšku – *Obrázek 14*. Oba kalíšky jsou umístěny vedle sebe do uchycovacího aparátu a zahřívány současně v kalorimetrickém přístroji – *Obrázek 12*. V okamžiku fázové změny materiálu se dodává nebo odebírá teplo z kalíšku s analyzovaným vzorkem. Tato endotermní/exotermní reakce je důsledkem nenulového teplotního rozdílu, který je reprezentován jako vrchol křivky tepelného toku v čase. Kalíšky jsou umístěny v kalorimetrické cele na oddělených teplotních čidlech zapojených anti sériově [21, 22]. Na *Obrázku 13* je znázorněn průřez kalorimetrického přístroje.



*Obrázek 12. Přístroj SETSYS EVOLUTION TGA-DTA/DSC [21]*



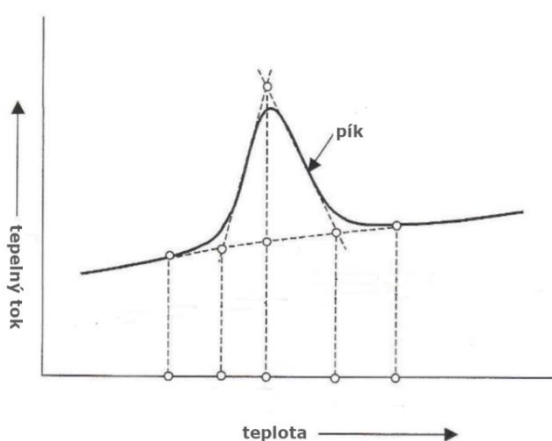
*Obrázek 13. Průřez přístrojem [21]*



Obrázek 14. Kališky a aparát na jejich uchycení [21]

Místo měření příkonu se měří difference teplot zkoumaného vzorku a referenčního kalíšku, které jsou spojeny tepelným mostem. Rozdíl teplot je zapsán jako tepelný tok od/do vzorku. Tento tok je úměrný rozdílu teplot. Tepelný tok je následně vyneseno do grafické závislosti na čase. V tomto experimentu byla místo rozdílu teplot vzorku a referenčního kalíšku měřena difference napětí na termočláncích. Hodnoty jsou proto uvedeny v  $\mu\text{V}$ . Pro měření ve standardních jednotkách by bylo nutné přístroj kalibrovat. Bylo by tak možné například určit množství uvolněného fázového tepla. Pro účely určení teplot fázových přechodů, které se projeví poklesem či nárůstem v závislosti na teplotě měřené třetím, nezávislým termočláncem, však kalibrace nutná není.

Vzniklé vrcholy (píky) znázorňují exotermickou či endotermickou reakci. Plocha pod píkem je přímo úměrná uvolněnému teplu, které se při reakci uvolnilo nebo spotřebovalo. Velikost píku je závislá na rychlosti zahřívání či chladnutí vzorku [17, 23].



Obrázek 15. Příklad výstupu z DSC [23]

Jednotlivé běhy každé termické analýzy se skládaly ze tří fází. V první fázi docházelo za přítomnosti argonu (s průtokem 20 ml/min přes měřicí komoru) k zahřátí zkoumaného přípravku na 30 °C, v druhé fázi se slitina ohřívala s rychlostí 10 °C/min na 290 °C a v poslední fázi se zase ochlazovala zpět na 30 °C stejnou rychlostí.



U každého analyzovaného vzorku bylo provedeno toto měření dvakrát, a to z důvodů získání přesnějších výsledků. Jedno měření trvalo přibližně dvě hodiny. Následně byl určen procentuální rozdíl změřených a tabulkových hodnot teplot tání základních prvků a eutektické slitiny, aby se zjistilo, které z provedených měření je přesnější.

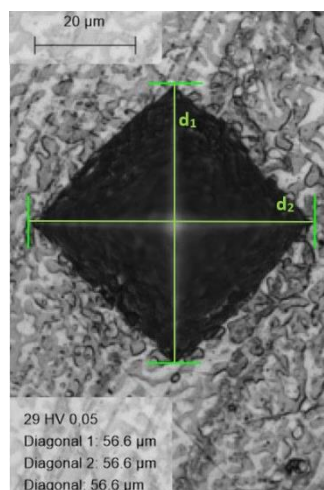
### 2.2.3 Vickersova zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti vzorků, neboli odolnosti materiálu proti vniknutí cizího tělesa, je provedena pomocí mikrotvrdoměru. Zkouška probíhá tak, že se na podložku položí dané vzorky a speciálním nástavcem tvaru čtyřbokého jehlanu (indenteru) s diamantovým hrotem, jehož vrcholový úhel je  $136^\circ$ , se provede podle nastaveného zatížení vtisk. Poté se změří délka u obou úhlopříček vtisku. Zkouška je úspěšná, pokud mají úhlopříčky srovnatelnou velikost. Zatěžující síla se volí standardně v kg, respektive kgf (kilogram-force). Výsledná hodnota tvrdosti pak může být v  $\text{N/mm}^2$ , ale také v  $\text{kgf/mm}^2$  – výsledek se poté liší o gravitační konstantu  $g$ . Hodnota tvrdosti se definuje jako poměr zatěžovací síly ku povrchu vtisku. Pro přesnost se tento poměr vynásobí ještě konstantou, vznikne tedy vzorec [16]:

$$HV = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2} \left( \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right), \quad (3)$$

kde  $F$  označuje zatěžovací sílu a  $d$  úhlopříčku vtisku. Na displeji mikrotvrdoměru je zobrazován zvětšený obraz čtvercového vtisku a vyhodnotí se poměr použité síly a délky úhlopříček, z čehož se automaticky vypočítá tvrdost analyzovaného vzorku [16].

Na *Obrázku 16* je zobrazen skutečný vtisk indenteru do pájecí slitiny Bi59Sn40Ga1. Z obrázku jsou jasně viditelné úhlopříčky, které mají srovnatelnou délku, a proto lze z tohoto obrazce určit tvrdost. Mikrotvrdoměr též blíže zobrazuje povrch dané slitiny a je možno vidět, jak vypadá povrch slitiny v řezu.



Obrázek 16. Příklad Vickersovy zkoušky na slitině Bi59Sn40Ga1

Na *Obrázku 17* je zobrazen mikrotvrdoměr DuraScan G5 od firmy EMCO-TEST, na kterém je provedena zkouška tvrdosti. Jeho hlavní částí je soubor nástavců, kde dva z toho jsou určeny pro snímání analyzovaného povrchu pro přiblížení 5x a 50x a třetí nástavec (indenter) je určen pro vytvoření požadovaného vtisku, který je následně změřen. Popsanou metodou v předchozím odstavci je stanovena tvrdost materiálu. Veškeré vytvořené obrazce lze pozorovat na obrazovce umístěné vedle podložky, na kterou se pokládá zkoumaný vzorek [24].



*Obrázek 17. Mikrotvrdoměr DuraScan G5 [24]*

## **2.2.4 Skenovací elektronová mikroskopie**

Tradiční optická mikroskopie nedokáže zcela splnit podmínky pro ideální pozorování těles s reflexní a nepravidelnou strukturou. Jeden alternativní způsob, jak zajistit lepší podmínky pozorování je skenovací elektronová mikroskopie – SEM.

Princip SEM je založen na zaostřeném paprsku elektronů a detekci odrazu tohoto paprsku pro zvětšení vzorků, které jsou uloženy ve vakuové komoře. Skenují se hlavně vodivé vzorky. Jeli však materiál izolant, lze využít různých technik, které pozorování umožní. Jednou z nich je snížení vakua v komoře, nebo také připojení napětí mezi vzorek a zem [25].

Elektronový mikroskop, na kterém je analýza povrchu provedena, má detektory elektronů a rentgenových paprsků. Detektory zpětně odražených elektronů nám dávají informaci o topografii, detektor specifického rentgenového záření, které je emitováno při interakci svazku s povrchem, nám dává informaci o prvkovém složení. Tyto signály jsou poté převedeny na vysoce kvalitní obrazy, které lze zobrazit na běžné počítačové obrazovce [25].

Vytvořené obrazy jsou v odstínech šedé, nejsou tedy k dispozici žádné informace o barvě povrchu. Různé odstíny šedi jsou způsobeny různým prvkovým složením – prvky s vysokým atomovým číslem jsou ve vytvořených obrazech světlejší a prvky s nízkým atomovým číslem jsou tmavší, ale také nerovností povrchu (např. dírami a výstupky). U výsledných obrazů lze pro lepší vizualizaci vhodně upravovat kontrast a světelnost [25].

V této práci byl použit elektronový mikroskop Phenom ProX Desktop od firmy Thermo Fisher Scientific – *Obrázek 18*. Skenovací elektronový mikroskop je vhodný jak pro zobrazování struktury materiálů, tak pro jejich analýzu. Strukturu vzorků lze fyzicky prozkoumat a stanovit její elementární složení. Přístroj má mnoho funkcí jako je bodová analýza, mapování, skenování v přímce a mnoho dalších [26].



*Obrázek 18. Elektronový mikroskop Phenom ProX Desktop [26]*

## 2.3 Výsledky experimentu

### 2.3.1 Termická analýza

V *Tabulce 4* jsou uvedeny naměřené hodnoty teplot tání a tuhnutí pro čistý bismut, cín a eutektickou slitinu Bi58Sn42 a zjištěná hodnota teploty tání gallia. Teplota tání gallia nemohla být změřena, protože je příliš nízká a vzorek gallia by se roztavil dříve, než by k měření vůbec došlo. V *Tabulce 4* značí  $T_{TA1}$  a  $T_{TA2}$  teplotu tání změřenou napoprvé a napodruhé,  $T_{TU1}$  a  $T_{TU2}$  teplotu tuhnutí změřenou napoprvé a napodruhé,  $T_{TAB}$  [27] tabulkovou hodnotu teploty tání,  $\delta_1$  a  $\delta_2$  procentuální odlišnost naměřené a tabulkové hodnoty v prvním a druhém měření.

Jak již bylo popsáno v kapitole o průběhu experimentu, každá hodnota byla pro přesnější zhodnocení naměřena dvakrát. Poté byly hodnoty teplot tání základních prvků (bismutu a cínu) a eutektické slitiny porovnány s hodnotami tabulkovými [27] a byl vypočítán procentuální rozdíl mezi nimi. Tímto jsme zjistili, která z naměřených hodnot u tříprvkových pájek je pro tento experiment relevantnější. Rozdíly všech naměřených hodnot však nepřesáhly 4 %, můžeme je tedy pokládat za úspěšné. Ze spočítané procentuální odlišnosti je zřejmé, že měření provedené jako první, se svými hodnotami liší od tabulkových hodnot méně než měření prováděné napodruhé. Bylo však předpokládáno, že přesnější bude měření druhé, kvůli zániku nežádoucích oxidů na povrchu slitin během prvního procesu. Tato teorie byla na základě výsledků vyvrácena.

Teploty tuhnutí a tání obou běhů a tříprvkových zkoumaných slitin Bi59Sn40Ga1, Bi57Sn40Ga3, Bi50Sn40Ga10, Bi30Sn40Ga30 a Bi10Sn40Ga50 jsou zapsány v *Tabulce 5*.

U každé jednotlivé slitiny byly poté mezi sebou porovnány teploty tání a tuhnutí z prvního měření. Zde také představuje  $T_{TA1}$  a  $T_{TA2}$  teplotu tání změřenou napoprvé a napodruhé,  $T_{TU1}$  a  $T_{TU2}$  teplotu tuhnutí změřenou napoprvé a napodruhé a  $\Delta_1$  rozdíl mezi teplotami tání a tuhnutí z prvního běhu.

Nejnižší teplotu tání z prvků má gallium, přidáme-li jej tedy do bismut-cínové slitiny, sníží se její teplota tání. Z naměřených hodnot je zřejmé, že s vyšší koncentrací gallia se teplota tání snižuje. Nejnižší teplotu tání dosahuje tedy slitina Bi10Sn40Ga50 34 °C. Tato hodnota tání je však pro běžné pájení zcela nepřijatelná, neboť pokud by se pájená součástka na tuto teplotu zahřála (což je velmi pravděpodobné), pájený spoj by se roztavil. Tato hodnota nám však poslouží k sestrojení pseudobinárního diagramu.

Nejnižší rozdíl mezi teplotou tání a tuhnutí je u slitiny Bi30Sn40Ga30, rozdíl mezi těmito hodnotami je 7,4 °C. Eutektická slitina Bi58Sn42 má tuto hodnotu rovnou 12,3 °C. Této hodnotě se nejvíce přibližuje slitina Bi50Sn40Ga10 s rozdílem mezi teplotou tání a tuhnutí rovnou 12,4 °C.

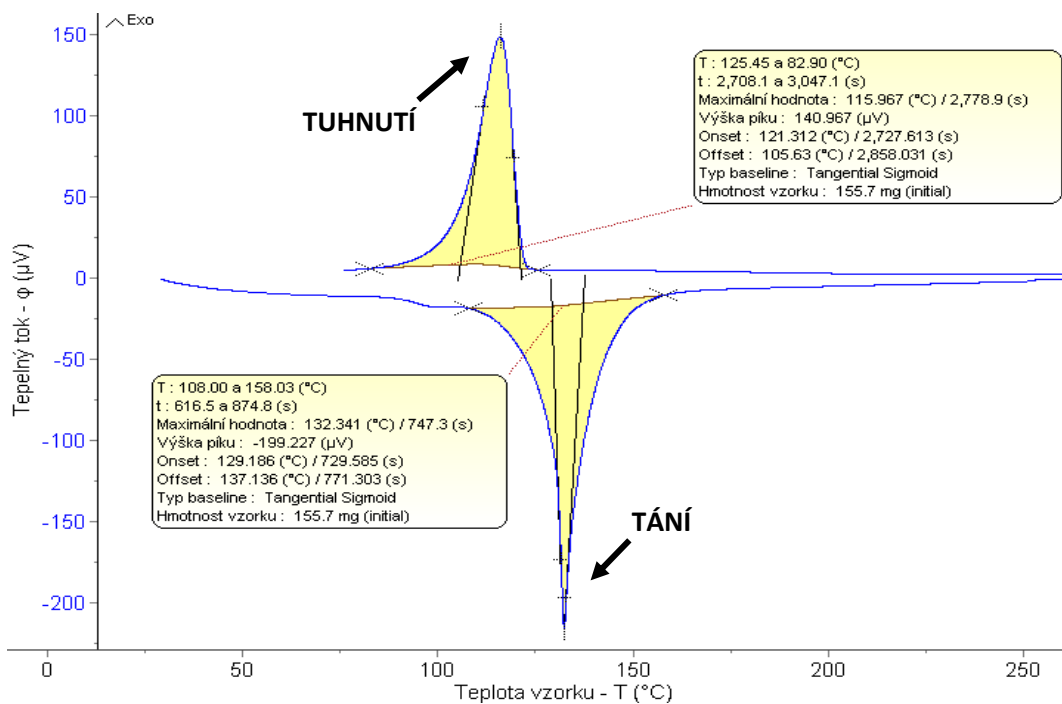
| Měřený vzorek | $T_{TA1}$<br>(°C) | $T_{TA2}$<br>(°C) | $T_{TU1}$<br>(°C) | $T_{TU2}$<br>(°C) | $T_{TAB}$ [21]<br>(°C) | $\delta_1$<br>(%) | $\delta_2$<br>(%) |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| Bi            | 268,9             | 267,4             | 248,8             | 234,1             | 271,4                  | 0,90              | 1,46              |
| Sn            | 229,9             | 228,8             | 188,1             | 188,0             | 231,9                  | 0,87              | 1,34              |
| Ga            | -                 | -                 | -                 | -                 | 29,8                   | -                 | -                 |
| Bi58Sn42      | 139,6             | 133,4             | 127,3             | 127,0             | 138,0                  | 1,13              | 3,31              |

Tabulka 4. Teploty tání a tuhnutí základních prvků a eutektické slitiny

| Měřený vzorek | $T_{TA1}$<br>(°C) | $T_{TA2}$<br>(°C) | $T_{TU1}$<br>(°C) | $T_{TU2}$<br>(°C) | $\Delta_1$<br>(°C) |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Bi59Sn40Ga1   | 144,3             | 128,9             | 124,7             | 124,1             | 19,6               |
| Bi57Sn40Ga3   | 129,2             | 117,4             | 121,3             | 120,8             | 7,9                |
| Bi50Sn40Ga10  | 97,0              | 94,8              | 109,4             | 109,6             | 12,4               |
| Bi30Sn40Ga30  | 83,4              | 88,6              | 90,8              | 90,4              | 7,4                |
| Bi10Sn40Ga50  | 34,7              | 30,2              | 78,1              | 77,7              | 43,4               |

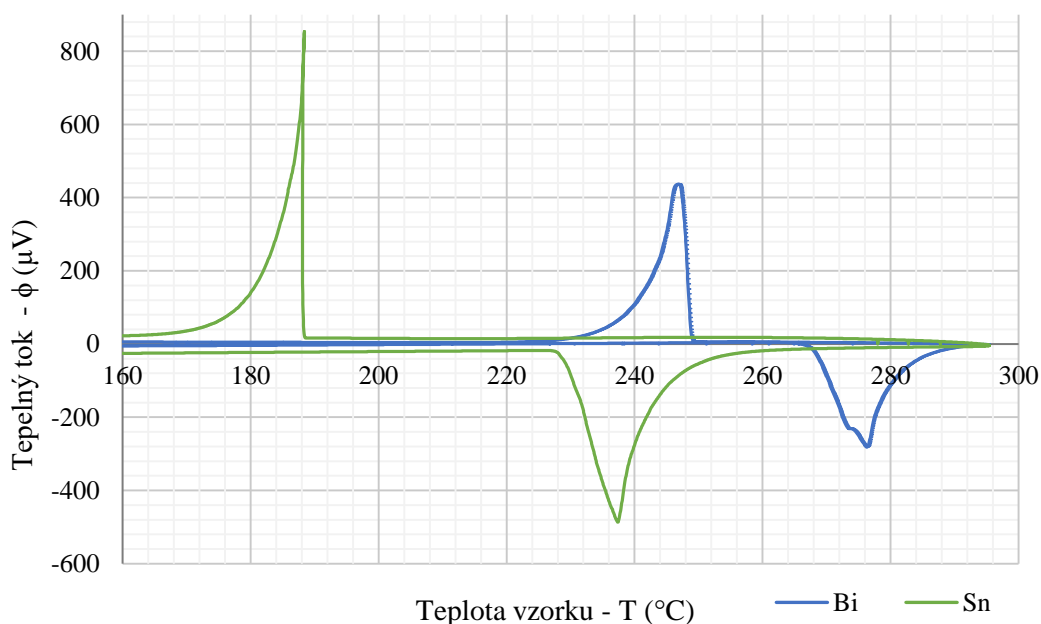
Tabulka 5. Teploty tání a tuhnutí analyzovaných tříložkových pájek

V Grafu 1 je příklad výstupu z kalorimetrického přístroje – průběh změn skupenství analyzovaných vzorků, tedy změny z pevného skupenství vzorků na tekuté a zpět na pevné. Průběh je brán z prvního měřenému cyklu. Je zde i zaznamenaná teplota tání a tuhnutí vzorků s dalšími parametry materiálu a provedeného měření. Tepelný tok není uveden ve Watech – W (Joulech za sekundu –  $J \cdot s^{-1}$ ), nýbrž v mikro Voltech –  $\mu V$ . To je z důvodu nezkalibrovanosti měřicího přístroje.



Graf 1. Závislost tepelného toku na teplotě pro Bi57Sn40Ga3

V Grafu 2 jsou zobrazeny průběhy termických analýz cínu a bismutu. Z grafů je zřejmý jejich rozdíl teploty tání a tuhnutí. Průběhy jsou brány z prvního měřeného cyklu.

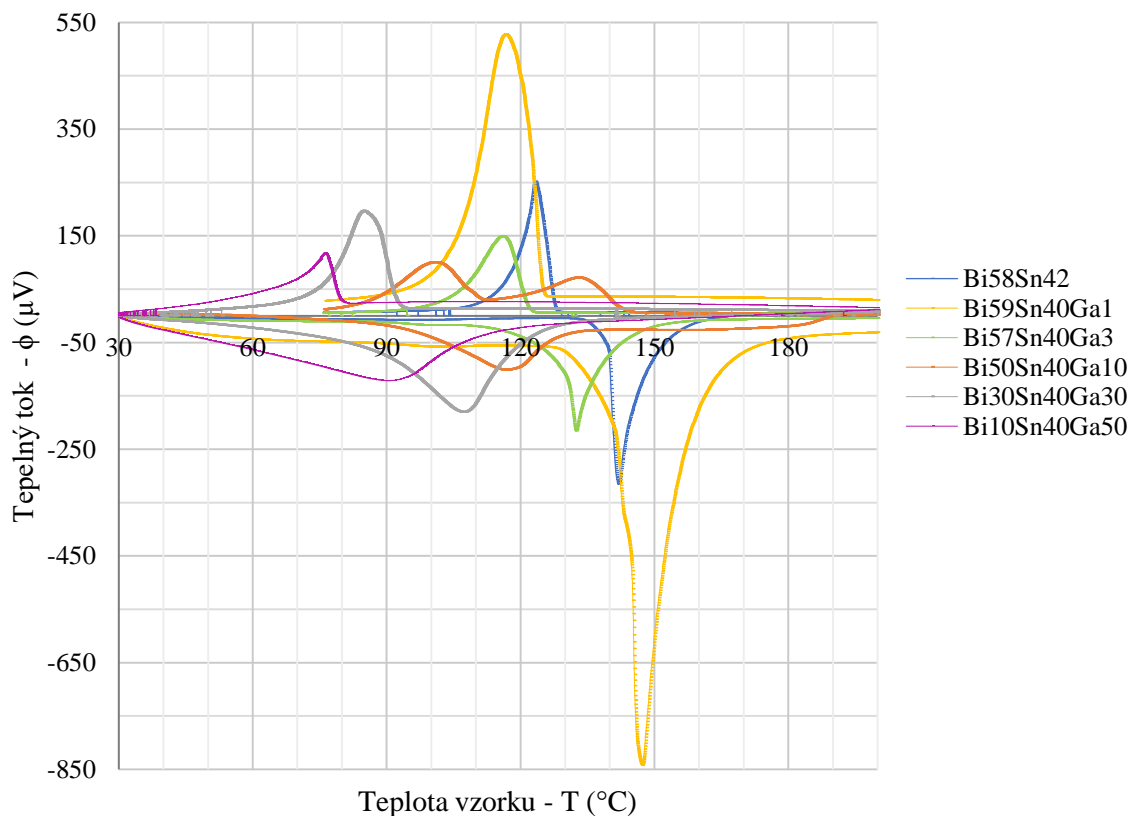


Graf 2. Termická analýza základních stavebních prvků slitin

V následujícím grafu – Graf 3 lze vidět sestavenou stejnou závislost jako v předchozím grafu, tedy závislost tepelného toku na teplotě. Zde však jsou již závislosti všech zkoumaných slitin. Tyto průběhy jsou též brány z prvního měřeného cyklu. Markantní rozdíl velikosti tepelného toku je dán rozdílnou navázkou vzorků. Pro přesnější porovnání by bylo třeba brát navážku naprosto stejnou.

Na některých průbězích je též možno pozorovat ukončené křivky (např. u Bi59Sn40Ga1). Jak již bylo zmíněno v kapitole o diferenciální skenovací kalimetrii, jednotlivé běhy každé termické analýzy se skládaly ze tří fází. Slitiny s nižším procentem gallia tály a tuhly při vyšších teplotách, jejich závislost křivky tání a tuhnutí je proto brána z oblasti druhé fáze běhu a křivka není ukončena až zpět do 30 °C, kde už byla fáze třetí. Naopak slitiny s vyšším procentem gallia měly měřené teploty tání a tuhnutí nižší, proto se zkoumaná křivka musela brát včetně třetí fáze procesu.

U slitiny Bi50Sn40Ga10 je možno vidět dvojí tuhnutí slitiny – dvě exotermické reakce, kdy bylo uvolňováno teplo. Tyto dvě reakce jsou znázorněny dvěma vrcholy na průběhu. Důvodem tohoto dvojího tuhnutí je pravděpodobně rozštěpení eutektické přímky ve struktuře slitiny [23].



Graf 3. Termická analýza tříložkových pájek

### 2.3.2 Měření tvrdosti

V *Tabulce 6* jsou uvedeny naměřené průměrné hodnoty tvrdosti zkoumaných vzorků. Podrobnější tabulka se všemi výsledky se nachází v přílohách – *Příloha 1* a *Příloha 2*. Stavební prvky bismut a cín byly podrobeny zkoušce tvrdosti se zatížením 0,1 kg – **HV 0,1**. Tvrdost u těchto prvků byla změřena desetkrát. Z naměřených hodnot je zřejmé, že o trochu vyšší tvrdost má bismut. Rozdíl v tvrdosti bismutu a cínu je však minimální. Tvrdost třetího stavebního prvku

gallia nemohla být změřena z důvodu jeho nízké teploty tání. Gallium by se pod tlakem indenteru mohlo roztavit a následně se natavit na diamantový hrot a tím ho znehodnotit.

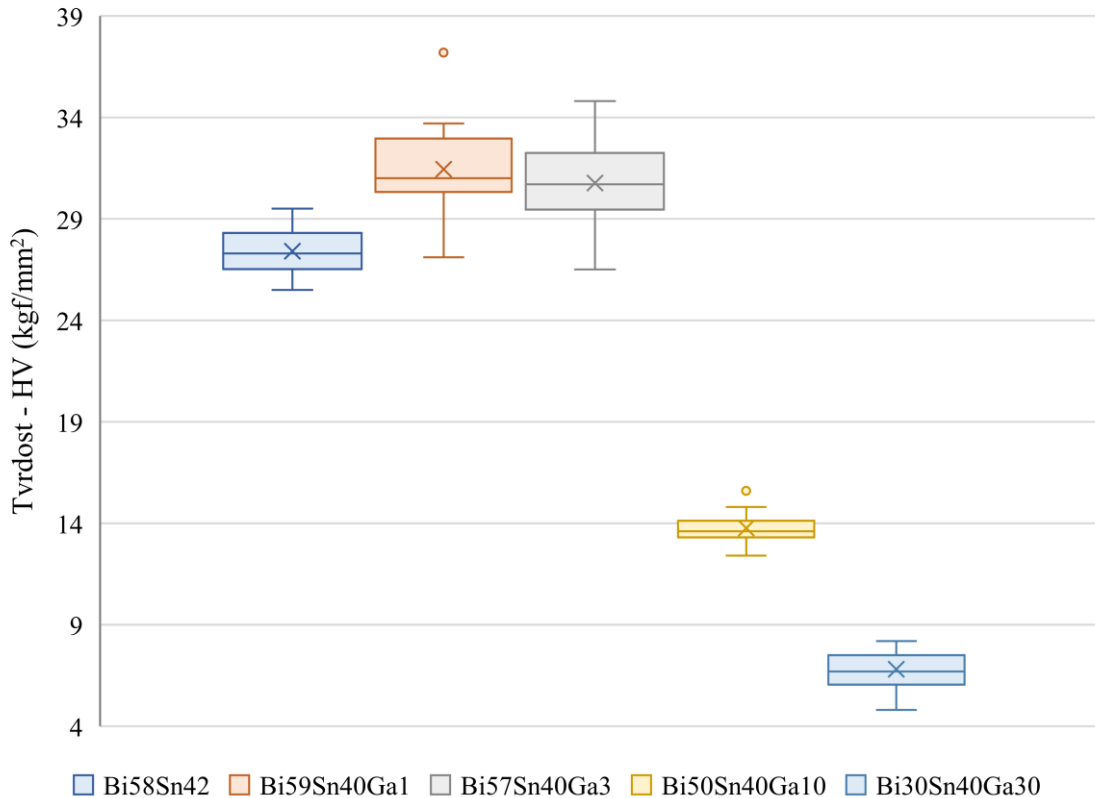
Změřené tvrdosti slitin Bi58Sn42, Bi59Sn40Ga1, Bi57Sn40Ga3, Bi50Sn40Ga10, Bi30Sn40Ga30 jsou též zapsány v *Tabulce 6*. U těchto vzorků bylo měření tvrdosti pro větší přesnost provedeno dvacetkrát. U slitin s galliem o 1 % a 3 % se zatížením 0,05 kg – **HV 0,05** a u zbylých slitin se zatížením 1 kg – **HV 1**. Z naměřených hodnot vyplývá, že se zvyšujícím se procentuálním zastoupení gallia se tvrdost materiálu snižuje. Oproti eutektické slitině Bi58Sn42 mají tříprvkové slitiny s přidaným galliem a procentuálním zastoupení 1 % a 3 % statisticky významně (dle provedeného statistického Studentova T-testu s hladinou významnosti  $\alpha = 5 \%$ ) vyšší tvrdost. U zbylých slitin byla naopak naměřena tvrdost oproti eutektické slitině výrazně nižší.

Tvrdost slitiny Bi10Sn40Ga50 nemohla být změřena ze stejného důvodu jako u čistého gallia. Její teplota tání je příliš nízká, a to by mohlo ohrozit nejen výsledky měření, ale i samotný přístroj.

| Měřený vzorek  | Ø Tvrdost (kgf/mm <sup>2</sup> ) |
|----------------|----------------------------------|
| <b>HV 0,1</b>  |                                  |
| Sn             | 13,0                             |
| Bi             | 14,0                             |
| <b>HV 0,05</b> |                                  |
| Bi58Sn42       | 27,4                             |
| Bi59Sn40Ga1    | 31,4                             |
| Bi57Sn40Ga3    | 30,8                             |
| <b>HV 1</b>    |                                  |
| Bi50Sn40Ga10   | 13,8                             |
| Bi30Sn40Ga30   | 6,8                              |

*Tabulka 6. Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků*

V *Grafu 4* jsou sestrojené krabicové diagramy tvrdosti eutektické slitiny a zkoumaných tříprvkových slitin. V diagramech jsou graficky znázorněny průměrné hodnoty křížkem, maximální a minimální hodnoty okrajovými čárkami, kvartily hranami obdélníku a medián je čára uprostřed obdélníku. V těchto grafech je tedy pro přehlednost znázorněno rozložení naměřených hodnot tvrdosti.



Graf 4. Krabicové diagramy naměřené tvrdosti zkoumaných slitin

### 2.3.3 Analýza struktury

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, zkoumané slitiny na bázi cínu a bismutu s přidáním třetím prvkem galliem byly též podrobeny skenovací elektronové mikroskopii. Této analýze byla podrobena i referenční eutektická slitina. Strukturální analýza má hned několik důvodů. První důvod je, že se pomocí ní získá přesné procentuální rozložení prvků ve struktuře. Dále lze detailněji prozkoumat strukturu slitiny a zjistit, jak se jednotlivé prvky mezi sebou mísí.

V *Tabulce 7* jsou zapsaná průměrná naměřená procentuální zastoupení prvků v jednotlivých slitinách. To bylo určeno pomocí prvkové analýzy několika náhodně vybraných oblastí z každé slitiny. Nepřesnosti procent mohou být způsobeny tím, že daná analýza struktury byla prováděna z oblasti, kde bylo rozložení prvků odlišné než v celé struktuře slitiny. Dalšími důvody mohou být nedokonalé rozpuštění prvků během vytváření slitiny a během žíhání, drobná ztráta navážených prvků během manipulace, anebo ne zcela přesná navážka. Soupis všech naměřených procent je následně uveden v příloze – *Příloha 3*.



| Slitina      | Průměrné zastoupení prvků ve slitině (%) |       |       |
|--------------|--|-------|-------|
|              | Sn                                       | Bi    | Ga    |
| Bi58Sn42     | 39,84                                    | 60,16 | -     |
| Bi59Sn40Ga1  | 36,59                                    | 62,43 | 0,98  |
| Bi57Sn40Ga3  | 35,45                                    | 63,09 | 1,46  |
| Bi50Sn40Ga10 | 20,22                                    | 74,25 | 5,53  |
| Bi30Sn40Ga30 | 39,46                                    | 46,55 | 13,99 |

Tabulka 7. Změřené procentuální zastoupení prvků ve slitinách

V Obrázku 19 a 20 jsou zobrazeny struktury analyzovaných slitin se zvětšením 1 000x. Na Obrázku 19 a) je zobrazena struktura eutektické slitiny tvořené pouze cínem a bismutem. Světlé oblasti představují fázi tvořenou prakticky jen bismutem (přibližně z 90 %) a tmavé představují fázi tvořenou bismutem a cínem, ve kterém je zastoupení obou prvků skoro shodné. Jsou zde vidět velké světlé oblasti, které jsou děleny oblastmi tmavými, přičemž tmavé oblasti zabírají menší plochu než světlé. Uprostřed obrázku je vidět tmavá skvrna a v ní drobné světlé části. I v těchto oblastech jsou světlé oblasti tvořeny převážně bismutem a tmavé jsou tvořeny oběma prvky. Bismut však ve světlých oblastech nedosahuje 90 %, ale přibližně 70–80 %. To je způsobené pravděpodobně tím, že světlé oblasti jsou zde velmi drobné a vliv bismutu se tolik neprojeví.

Prvkové rozložení bylo zjištěno na základě linescan analýzy (skenování v přímce). V těchto linescanech je vidět, jak se jednotlivé prvky mezi sebou ve zhotovené přímce mísí. Linescany jednotlivých slitin jsou zobrazeny v Grafu 5, 6 a 7. V Grafu 5 a) je vidět výrazná změna rozložení prvků, která přesně odpovídá tomu, že ve světlých oblastech převažuje bismut a tmavé oblasti představují téměř rovnoměrné rozložení. Na Obrázku 21 a 22 je znázorněno, ve kterých místech byl linescan proveden. Tato analýza se dělala u slitin Bi58Sn42, Bi59Sn40Ga1 a Bi57Sn40Ga3 při zvětšení 8 000x a u slitin Bi50Sn40Ga10 a Bi30Sn40Ga30 5 000x. Rozdílné zvětšení bylo zvoleno kvůli velmi odlišnému strukturálnímu rozložení slitin.

Obrázek 19 b) a 19 c) představuje sloučeniny s přidaným galliem 1 % a 3 %. Kvůli malému procentuálnímu rozdílu gallia jsou struktury velmi podobné. Ve strukturách těchto slitin je rozložení světlých a tmavších částí již rovnoměrné a obě oblasti zabírají přibližně stejnou plochu. V tmavých oblastech jsou frekventované světlé tečky, které jsou drobnější než v předchozí struktuře. Názorněji je tento jev vidět na Obrázku 21 b) a c). Tyto drobné tečky jsou četnější u slitiny Bi59Sn40Ga1. Na obrázcích jsou oproti eutektické slitině též černá místa, která znázorňují malé prohlubiny.

Z linescanu – Graf 6 b) a c) těchto dvou slitin je zřejmé, že světlá místa jsou jako u eutektické slitiny tvořena z 90 % bismutem a jen malé procento tvoří cín a gallium. Tmavá místa

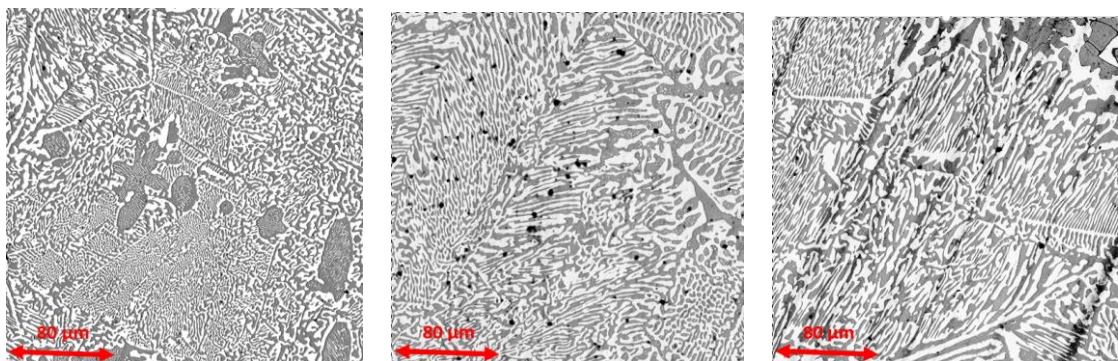
jsou opět tvořena směsí cínu a bismutu, navíc k tomu je v těchto oblastech zřejmý procentuální nárůst gallia. Tento nárůst není tak skokový jako nárůst cínu. Je to z toho důvodu, že gallium v celkovém objemu zabírá pouze 1 % a 3 %.

Struktura slitin  $\text{Bi50Sn40Ga10}$  a  $\text{Bi30Sn40Ga30}$  je zobrazena na Obrázku 20 d) a e). Je zřejmé, že struktury těchto dvou slitin se oproti předcházejícím slitinám výrazně liší. Při stejném zvětšení jsou oblasti představující různé fáze výrazně větší, a navíc jsou zde zřetelné z linescanů tři fáze – bílá oblast, šedá a tmavá, kde procentuální rozložení výrazně kolísá, viz Graf 7 d) a e).

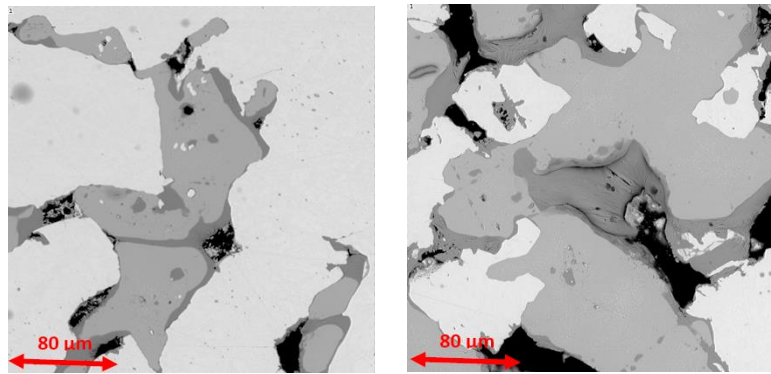
U slitiny s 10 % gallia – Obrázek 20 d) převažují bílá místa, která znázorňují skoro čistý bismut. Zbytek slitiny tvoří šedá a tmavá místa. Šedá místa představující s cca 80% zastoupením cínu a 20% zastoupením směsí gallia a bismutu. Tmavá místa, ve kterých převažuje 80% zastoupení gallia s 20% zastoupením bismutu a cínu, zabírají ve struktuře nejmenší plochu. Prohlubiny znázorněné černou barvou jsou zde mnohem větší než v předchozích případech.

Z Obrázku 20 e) slitiny  $\text{Bi30Sn40Ga30}$  je zřejmé, že oblasti zmíněných fází jsou též velmi rozsáhlé. Oproti slitině s 10 % gallia zde převažují šedé oblasti s cca 80% zastoupením cínu. Bílé oblasti zabírají menší plochu a složka bismutu zde klesá na přibližně 90 % a zbylou část zde tvoří převážně cín. Tmavé oblasti jsou u této slitiny výrazně větší a zastoupení gallia kolísá mezi 80 % a 90 %. Černá místa znázorňující prohlubiny jsou v této slitině ještě větší než u předchozí slitiny.

Struktura slitiny  $\text{Bi10Sn40Ga50}$  nebyla provedena, protože výbrus této slitiny nemohl být zhotoven. Její teplota tání je příliš nízká, a to by mohlo ohrozit nejen slitinu během procesu vyrábění výbrusu, ale i přístroje provádějící výbrus.



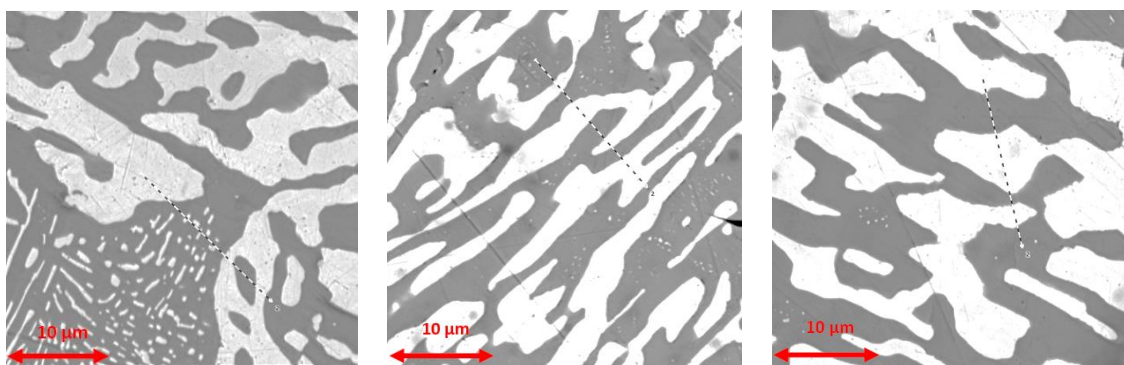
a) b) c)  
Obrázek 19. Mikrostruktura a)  $\text{Bi58Sn42}$ , b)  $\text{Bi59Sn40Ga1}$ , c)  $\text{Bi57Sn40Ga3}$



d)

e)

Obrázek 20. Mikrostruktura d)  $\text{Bi}_{50}\text{Sn}_{40}\text{Ga}_{10}$  e)  $\text{Bi}_{30}\text{Sn}_{40}\text{Ga}_{30}$

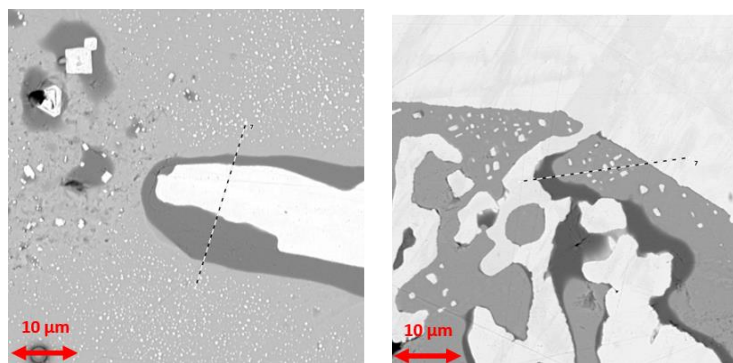


a)

b)

c)

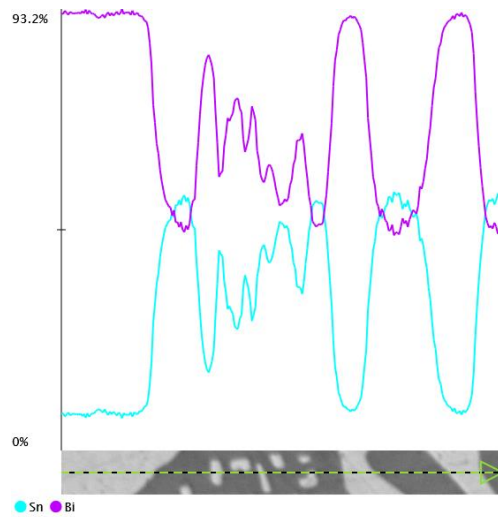
Obrázek 21. Umístění linescanů a)  $\text{Bi}_{58}\text{Sn}_{42}$ , b)  $\text{Bi}_{59}\text{Sn}_{40}\text{Ga}_1$ , c)  $\text{Bi}_{57}\text{Sn}_{40}\text{Ga}_3$



d)

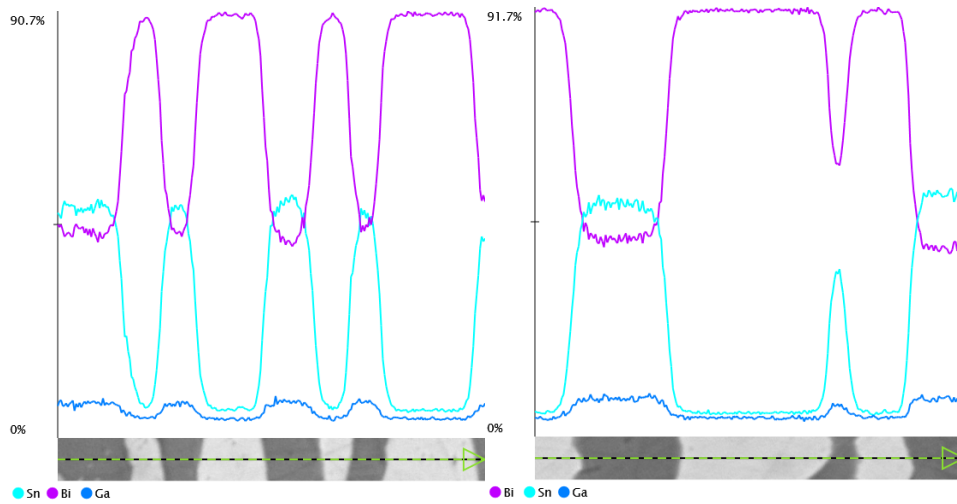
e)

Obrázek 22. Umístění linescanů d)  $\text{Bi}_{50}\text{Sn}_{40}\text{Ga}_{10}$  e)  $\text{Bi}_{30}\text{Sn}_{40}\text{Ga}_{30}$



a)

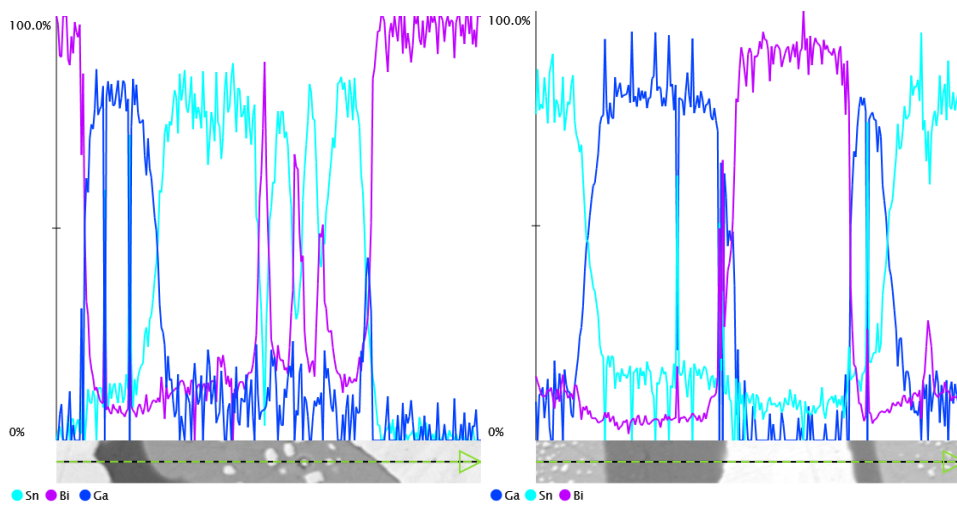
Graf 5. Linescan a) Bi58Sn42



b)

c)

Graf 6. Linescany b) Bi59Sn40Ga1, c) Bi57Sn40Ga3

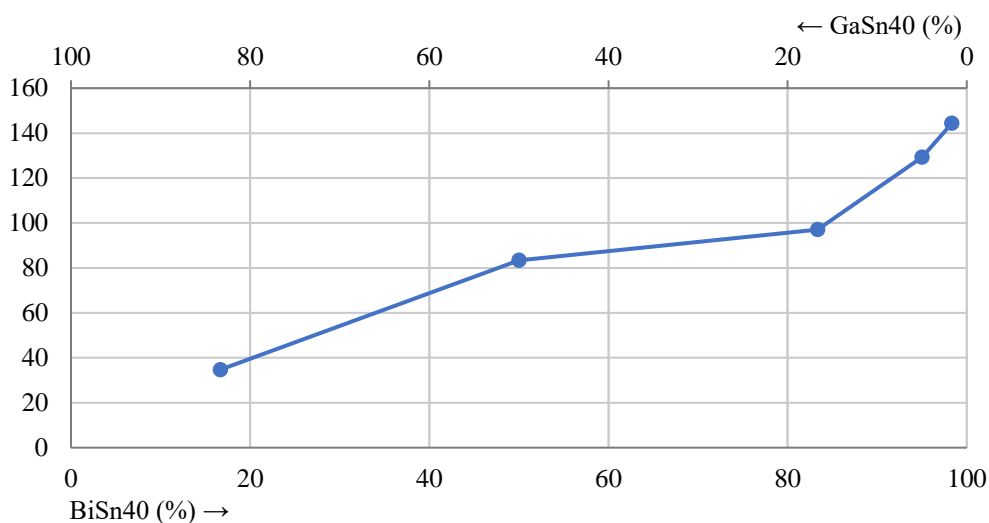


d)

e)

Graf 7. Linescany d) Bi50Sn40Ga10 e) Bi30Sn40Ga30

Znázornění pseudobinárního diagramu je uvedeno v *Grafu 8*. V diagramu je konstantní složka cín, která zůstává na 40 %, a proměnné složky jsou bismut a gallium. Z grafu je zřetelně vidět, že se zvyšujícím se procentem gallia, klesá teplota tuhnutí slitiny.



*Graf 8. Pseudobinární diagram BiSn40Ga*

## 2.4 Diskuze a závěr experimentu

Pomocí termické analýzy bylo ověřeno, že pokud se do slitiny na bázi cínu a bismutu přidá gallium o vyšším procentuálním zastoupení nežli 1 %, sníží se teplota tání a tuhnutí. Z naměřených hodnot je očividné, že z hlediska termického je nejideálnější pájkou zkoumaných třísloužkových sloučenin sloučenina  $\text{Bi}_{57}\text{Sn}_{40}\text{Ga}_3$ , která má teplotu tání  $129,2\text{ °C}$  a teplotu tuhnutí  $121,2\text{ °C}$ . Tyto dvě hodnoty jsou nižší než hodnoty teploty tání a tuhnutí eutektické slitiny, které vyšly  $139,6\text{ °C}$  a  $127,3\text{ °C}$ . Proto by byla slitina  $\text{Bi}_{57}\text{Sn}_{40}\text{Ga}_3$  vhodná pro měkké pájení v elektrotechnice, která je náchylná na vysokou teplotu. Teplota tání u slitiny  $\text{Bi}_{59}\text{Sn}_{40}\text{Ga}_1$  byla naměřena  $144,3\text{ °C}$ , tedy o  $4,7\text{ °C}$  vyšší než u eutektické slitiny. Z toho vyplývá, že pokud je ve slitině přidáno pouze 1 % gallia, termické vlastnosti slitiny se nezlepší. Ostatní slitiny s vyšším obsahem gallia vykazovaly teploty tání markantně nižší. Pokud do bismut-cínové slitiny přidáme gallium o procentuálním zastoupení 10 %, teplota tání se sníží na  $97,0\text{ °C}$  a s 30 % zastoupením se sníží na  $83,4\text{ °C}$ . Tyto slitiny by se v určitých aplikacích daly též využít, ale pouze jen tam, kde součástky nejsou namáhány vysokým teplem. V opačném případě by hrozilo, že by se pájka roztavila a spoj by tím byl zničen. Slitina, ve které bylo 50 % gallia je na pájení co se týče teploty tání naprosto nepoužitelná, neboť její naměřená teplota činila  $34\text{ °C}$ .

Nejvyšší tvrdost byla naměřena u slitiny  $\text{Bi}_{59}\text{Sn}_{40}\text{Ga}_1$ , její průměrná tvrdost byla  $31,4\text{ kgf/mm}^2$ . Je zřejmé, že přidané gallium zvyšuje tvrdost této slitiny. Nejnižší hodnota tvrdosti byla následně naměřena u pájky  $\text{Bi}_{30}\text{Sn}_{40}\text{Ga}_{30}$   $6,8\text{ kgf/mm}^2$ . Vyšší tvrdost slitiny znamená

zároveň náchylnost na lámání, tedy vyšší křehkost. Proto by bylo vhodné slitiny také podrobit zkoušce houževnatosti a dalším mechanickým zkouškám.

Pomocí elektronové mikroskopie bylo zjištěno, že nejideálnější mísení prvků proběhlo u slitiny Bi59Sn40Ga1. Ze snímku pořízeném na mikroskopu to lze zhodnotit tím, že jednotlivé oblasti zastupující odlišné prvkové rozložení se u této slitiny nejvíce „střídají“ a jsou nejmenší. Struktury slitin s vysokým zastoupením gallia naopak znázorňují, že velké množství gallia způsobuje malou rozpustnost prvků a vznik velkých prohlubin, které jsou dány tepelnou roztažností. U těchto slitin nedošlo k dokonalému promíchání, které mohlo být dáno vlastnostmi slitin, ale také nevhodným, improvizovaným způsobem jejich přípravy. Slitiny mohly již během vytváření oxidovat. Pro další analýzu by bylo vhodné využít práce metalurga, jako tomu bylo v případě vytváření slitin s procentuálním zastoupením gallia 1 % a 3 %.

Ze získaných dat můžeme usoudit, že v analýze nejlépe obstála tříložková pájecí slitina Bi57Sn40Ga3. Tato slitina má ze všech měřených slitin nejideálnější teplotu tání, relativně vysokou odolnost vůči vniku cizího tělesa a nejlepší strukturu z hlediska mísení stavebních prvků. Srovnáme-li tuto slitinu s nepoužívanější bezolovnatou pájkou Bi58Sn42, je zřejmé, že přidané gallium zlepšuje obě měřené vlastnosti – teplotu tání i tvrdost. Otázkou však zůstává, zda by tato pájka obstála i v tahové, ohybové či stříhové zkoušce a zda by nebyla příliš křehká.

## **3 Ekonomická část**

### **3.1 Cíl ekonomické části**

Tato část je zaměřena na vyčíslení nákladů na pořízení a provoz pájecích zařízení. Jedná se o konvekční horkovzdušnou přetavovací pec Mistral 260 a pájecí zařízení pro pájení v parách ATF VP 400. Katedra technologie zvažuje koupi nového pájecího zařízení, které by podpořilo výzkum a publikaci této katedry, a zmiňovaná pájecí zařízení jsou vhodnými kandidáty. Pec Mistral 260 se již nachází na katedře elektrotechnologie a katedra s ní má příznivé zkušenosti. Pájecí zařízení pro pájení v parách ATF VP 400 není zcela běžné a katedra by díky tomuto přístroji získala přístup k unikátnímu typu pájení.

Na základě porovnání prvotních investic a následných ročních nákladů na provoz a obsluhu těchto zařízení lze usoudit, do jaké pece je výhodné investovat. V rámci porovnání jsou však uvažovány i další aspekty, jako je náročnost na obsluhu a případný publikační potenciál.

Lze předpokládat, že vyšší náklady na koupi bude vykazovat pájecí zařízení pro pájení v parách ATF VP 400. Tento předpoklad lze usoudit z toho, že zařízení ATF VP 400 je na rozdíl od Mistral 260 méně známé a dostupné, a jeho cena bude tedy vyšší. Zároveň i principy funkčnosti zařízení jsou odlišné, proto i z toho důvodu lze očekávat odlišné náklady na provoz.

### **3.2 Údaje o porovnávaných pájecích zařízeních**

Jak již bylo zmíněno v úvodu, porovnávané přístroje jsou určeny na pájení. U každého zařízení je však pájení založeno na jiném principu, pece tedy mají odlišné vlastnosti a parametry. V této kapitole jsou pro lepší orientaci stručně popsány charakteristiky obou pecí.

#### **3.2.1 Přetavovací pec Mistral 260**

Funkce pece Mistral 260 je založena na proudění horkého vzduchu s teplotou 300 °C, který obstarává rovnoměrné rozprostření teploty po celém pájeném objektu a zároveň zabraňuje stínovému efektu, tzn. nevznikají místa, která nepřijdou do styku s požadovaným množstvím pájky. Jsou zde tři teplotní zóny, přičemž dvě z nich slouží na předehřev pájené plochy a třetí je zóna pro samotné přetavení. Teplota v zónách je libovolně nastavitelná dle určeného teplotního profilu. Výhodami této pece jsou nižší teplotní namáhání desky plošných spojů než u ohřevu pomocí infračerveného záření, žádné množstevní omezení součástek na dopravníku, nezávislost pájení na barvě povrchu součástek a žádný vznik studených spojů. Pec je navíc snadná na obsluhu a údržbu díky jednoduchému přístupu ke všem částem pece [9].



Obrázek 23. Pec Mistral 260 [9]

### 3.2.2 Pájecí zařízení pro pájení v parách ATF VP 400

Toto pájecí zařízení slouží také pro pájení přetavením. Zařízení se skládá z celkem tří zón – samostatné vstupní a výstupní stanice, procesní komory a tepelně oddělené chladicí zóny. Princip zařízení spočívá v tom, že se do procesní komory vloží deska osazená součástkami, chladicí nádrž se naplní vodou, a následně dojde při požadovaném teplotním gradientu ke spájení požadovaných míst přetavením pomocí horkých par v atmosféře bez kyslíku. Tyto páry slouží jako médium pro přenos tepla. Během procesu pájení jsou zaručeny stabilní podmínky, které zajišťují homogenní distribuci energie v celé sestavě. Proces zahřívání není ovlivněn ani geometrickými parametry součástek a ani jejich hustotou. Výhodou je, že při tomto pájení nedochází k poškození součástek či delaminaci desek plošných spojů, neboť maximální možná teplota pájeného produktu nemůže nikdy překročit teplotu varu plynného média [28, 29].



Obrázek 24. Pájecí zařízení pro pájení v parách ATF VP 400 [29]



## 3.3 Výpočet nákladů

Náklady obecně můžeme rozdělit na náklady investiční, provozní a finanční. Do finančních nákladů patří například úhrada úroku, kurzové ztráty, náklady z finančního majetku a další. Pro zjednodušení jsou v rámci výpočtů tyto náklady zanedbány. V následujících kapitolách jsou shrnuty náklady investiční a náklady na provoz jednotlivých pecí. Všechny ceny jsou počítány s DPH a zároveň jsou všechny náklady uvažovány za okamžité výdaje, (dále jen „náklady“). Veškeré vstupy do modelu byly řádně diskutovány s vedoucím a konzultantem práce.

### 3.3.1 Investiční náklady

Investice do určitého stroje je dlouhodobá záležitost, je zapotřebí počítat s časovou hodnotou peněz. V době pořízení jsou investice výdajem a do nákladů se započítávají formou odpisů po dobu užívání stroje. Při rozhodování, zda se vyplatí určité investice, se používají různá kritéria ekonomické efektivnosti. V této práci jsou investice hodnoceny pomocí dvou metod, konkrétně metodou čisté současné hodnoty, neboli Net Present Value (dále také „NPV“), a metodou ročního ekvivalentního peněžního toku, neboli Retained Cash Flow (dále také „RCF“). Protože se jedná pouze o výdej peněz a žádný příjem, budeme zanedbávat konvenční značení výdaje znaménkem mínus.

#### 3.3.1.1 Čistá současná hodnota NPV

Většina rozhodování v oblasti kapitálového rozpočtování se řídí metodou NPV. Ve velké míře je NPV používána v oblasti financí a účetnictví pro stanovení hodnoty podniku, v oblasti investičních projektů a programů snižování nákladů. Čistá současná hodnota představuje součet hotovostních toků, které jsou diskontované. Tzn. že budoucí peněžní toky, neboli Cash Flow (dále také „CF“), v jednotlivých letech, jsou přepočítané na současnou hodnotu. K tomu je potřeba znát diskontní sazbu, což je alternativní náklad kapitálu, který určuje časovou hodnotu peněz a riziko. Tato sazba se může v průběhu životnosti investice měnit. Pro zjednodušení je v této práci sazba uvažována jako konstantní. Čistá současná hodnota je poté dána vztahem:

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t \cdot (1+r)^{-t}, \quad (2)$$

kde  $CF_t$  představuje peněžní tok v čase  $t$  a  $r$  představuje diskontní sazbu [30].

Tato metoda je velmi rozšířená, neboť bere v úvahu všechny příjmy, výdaje, kapitálové náklady spojené s investicí do jednotlivých ročních CF a také načasování každého peněžního toku, který může mít velký dopad na současnou hodnotu investice [31].

### 3.3.1.2 Roční ekvivalentní peněžní tok

Roční ekvivalentní peněžní tok představuje čistou současnou hodnotu projektu, která je vynásobena anuitním faktorem. Díky tomu se rovnoměrně rozdělí diskontované hotovostní toky do všech let v období životnosti projektu se započtením časové hodnoty peněz. S touto metodou se potkáme např. u porovnání projektů, které mají stejný rok počáteční investice, ale jinou dobu životnosti. Pro RCF platí vztah:

$$RCF = \frac{q^n \cdot (q - 1)}{q^n - 1} \cdot NPV, \quad (3)$$

kde  $n$  představuje počet let,  $NPV$  představuje čistou současnou hodnotu a  $q$  je definováno jako součet  $1 + r$ , přičemž  $r$  je diskontní sazba [30].

Tato metoda poskytuje přehled o zvýšení nebo snížení hotovosti, které má společnost na začátku jednoho účetního období. Roční ekvivalentní peněžní tok společnosti je důležitou metodou pro hodnocení finančního úspěchu společnosti [32].

### 3.3.1.3 Vyčíslení investičních nákladů

Do investic jsou zahrnuty pouze ceny nákupu pájecích zařízení. Na stránkách společnosti PrintTec b.v. je uvedena pořizovací cena horkovzdušné pece Mistral 8 500 €, což je v přepočtu dle kurzu měny k datu 27.12.2019 přibližně 216 596,- Kč. Životnost stroje je vyčíslena na 10 let. Cena pájecího zařízení v parách byla po konzultaci s firmou ABE.TEC, s.r.o. stanovena na 46 189 €, což je v přepočtu dle kurzu měny k datu 27.12.2019 přibližně 1 176 983,- Kč. Jeho životnost dosahuje přibližně 20 let. Ceny jsou uvažovány bez dopravy a instalace. Ceny a životnost jsou uvedeny v *Tabulce 8*.

| Pájecí zařízení | Pořizovací cena (Kč) | Životnost (rok) |
|-----------------|----------------------|-----------------|
| Mistral 260     | 216 596              | 15              |
| ATF VP 400      | 1 176 983            | 20              |

*Tabulka 8. Investiční náklady*

### 3.3.2 Provozní náklady

Provozní náklady vyjadřují, kolik peněz je nutné do zařízení vynaložit po dobu jeho životnosti. Náklady mohou být buď přímo spojené s užíváním a funkcí zařízení, nebo také s doplňkovou činností, která se zařízením souvisí. V této práci jsou náklady rozděleny na náklady na elektřinu, osobní náklady, náklady na materiál a náklady na údržbu a opravu. V následujících kapitolách jsou tyto náklady popsány a vyčísleny.

### 3.3.2.1 Náklady na materiál

Na každé pájení je potřeba pájená součástka, plocha, ke které je pájena, tj. deska plošných spojů, a pájecí pasta. Do pece se vejdou různé velké součástky a různé velké desky, přičemž jsou používány i různé pájecí pasty. Pro zjednodušení je uvažován pouze jeden typ těchto materiálů. Uvažujeme tedy SMD rezistor 1206 0R, jehož cena je 1,50,- Kč a plošný spoj pro pájení SMD součástek, který stojí 20,- Kč. Tyto plošné spoje si nechává fakulta vyrábět přímo na zakázku. Množství celkového materiálu záleží vždy na počtu projektů, které jsou na daném pájecím zařízení prováděny. Zároveň při každé objednávce desek, která probíhá dvakrát za rok, se musí platit příprava dat – převod digitálního modelu desky do reálného provedení, která stojí 500,- Kč. Při této objednávce se také kupuje šablona na nanášení pájecí pasty za cenu 2 000,- Kč. Jedná-li se o pájecí pastu, kupují se vždy na jeden rok dva 500g kelímky, jeden s olovnatou a jeden s bezolvnatou pájecí pastou. Pořizovací cena bezolvnaté pájecí pasty CP 220 typu Sn95.5Ag4Cu0.5 je 2 826,- Kč a olovnaté CP 120 typu Sn62Pb36Ag2 je 2 206,- Kč.

Na pájecí peci Mistral 260 je za rok provedeno přibližně 8 experimentů. Pokud bychom uvažovali, že na každý výzkum se spotřebuje stejně materiálu, pak můžeme vzít jeden již proběhlý experiment jako referenční a celkové množství materiálu následně pronásobit. Jako referenční experiment jsem použila experiment mého kolegy, ve kterém bylo spotřebováno celkem 192 desek plošných spojů, přičemž na každé desce bylo umístěno celkem 7 SMD rezistorů, celkem tedy 1 344 kusů rezistorů. Abychom dostali celkový počet desek plošných spojů a SMD rezistorů za rok, získané údaje stačí vynásobit celkovým počtem experimentů, kterých je celkem 8. S tímto zjednodušeným předpokladem vychází, že za rok je spotřebováno na těchto osmi experimentech 1 536 desek plošných spojů a 10 752 SMD rezistorů.

U pájecího zařízení ATF VP 400 lze provést samý předpoklad jako u předešlé pece, přičemž je pro zjednodušení předpokládáno, že se jedná o obdobný experiment. Rozdílem však je, že na tomto zařízení je předpoklad vyššího počtu experimentů. Počet výzkumů můžeme stanovit na 10 za rok. Tím dosáhne celkový počet desek 1 920 kusů a rezistorů 13 440 kusů. Pro pájení v parách bude kromě již zmiňovaných past potřeba navíc dokoupit speciální pájecí pastu pro pájení v parách. Takováto pájecí pasta LFS 216 pro pájení v parách stojí 3 109,- Kč.

Pro přehlednost je celkové potřebné zboží pro oba typy pájecího zařízení a jeho cena, která byla zjištěna od dodavatele, uvedena v *Tabulce 9*.

|                    |   | <b>Cena kusu<br/>(Kč)</b> | <b>Počet na rok<br/>(ks)</b> | <b>Celková cena za rok<br/>(Kč)</b> |
|--------------------|---|---------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Mistral 260</b> | SMD rezistor 1206 0R                                      | 2                         | 10 752                       | 16 128                              |
|                    | plošný spoj pro pájení SMD                                | 20                        | 1 536                        | 30 720                              |
|                    | příprava dat  | 500                       | 2                            | 1 000                               |
|                    | šablona na nanášení pájecí pasty                          | 2 000                     | 2                            | 4 000                               |
|                    | pájecí pasta CP 220                                       | 2 826                     | 1                            | 2 826                               |
|                    | pájecí pasta CP 120                                       | 2 206                     | 1                            | 2 206                               |
|                    | <b>Celková cena za materiál<br/>a administrativu (Kč)</b> | <b>56 880</b>             |                              |                                     |
| <b>ATF VP 400</b>  | SMD rezistor 1206 0R                                      | 2                         | 13 440                       | 20 160                              |
|                    | plošný spoj pro pájení SMD                                | 20                        | 1 920                        | 38 400                              |
|                    | příprava dat  | 500                       | 2                            | 1 000                               |
|                    | šablona na nanášení pájecí pasty                          | 2 000                     | 2                            | 4 000                               |
|                    | pájecí pasta CP 220                                       | 2 826                     | 1                            | 2 826                               |
|                    | pájecí pasta CP 120                                       | 2 206                     | 1                            | 2 206                               |
|                    | pájecí pasta Sn42Bi58                                     | 3 109                     | 1                            | 3 109                               |
|                    | <b>Celková cena za materiál<br/>a administrativu (Kč)</b> | <b>71 701</b>             |                              |                                     |

Tabulka 9. Náklady na materiál

### 3.3.2.2 Náklady na elektřinu

Náklady za elektřinu stejně jako náklady za materiál souvisí přímo s počtem experimentů, které se na daných pájecích zařízeních provádí. Cena elektřiny je brána 1,6 Kč/ kWh a cena za odběr 79 Kč/měsíc, dodavatelem je společnost PRE a ceny jsou brány pro prosinec 2019. Uvažujeme, že je na peci Mistral 260 je za rok provedeno 8 experimentů, přičemž zapájení 48 desek osazených 7 rezistory trvá přibližně dvě hodiny. Tento předpoklad je též převzat z již proběhlého experimentu. Z toho lze vypočítat, že za rok je pec v provozu 64 hodin. Jmenovitý příkon pece je 3 650 W při maximálním zatížení a její maximální teplota je 300 °C. Vzhledem k tomu, že u většiny teplotních profilů u pájení bezolovnatou pájecí slitinou je teplota PEAK cca 210–230 °C, dá se její příkon odhadovat při běžném provozu na 3 000 W. Jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, proces pájení je v peci rozdělen na tři fáze, v první dvou nastává předehřev a ve třetí samotné pájení. Proto pec nejede během celého provozu na plný příkon, ale na plný příkon jede jen 1/3 času. Zbylé 2/3 můžeme uvažovat poloviční příkon. Spotřebu ve stand-by režimu neuvažujeme, protože pokaždé, co se pec přestane používat, je vypojena ze sítě.

U pájecího zařízení ATF VP 400 je uvažována stejná cena za elektřinu i za odběr a zanedbána stand-by spotřeba jako u předchozího případu. Jmenovitá hodnota příkonu tohoto zařízení je 4 500 W. Protože zařízení nejede na plné zatížení, průměrnou hodnotu je možno

uvažovat 3 900 W. Na rozdíl od předešlé pece má konstrukce procesní a chladicí část, celkovou dobu procesu pájení lze rozdělit na samotné pájení a chlazení, které trvá přibližně 1/5 celkové doby s příkonem 3 000 W. Doba na zapájení 48 desek zde trvá déle než u průběžné pece – 3 hodiny. Vynásobíme-li tuto dobu s celkovým počtem desek, které bylo vypočítáno v předchozí kapitole, vyjde nám, že za rok je zařízení v provozu 120 hodin.

Vypočítaná spotřeba a cena za elektřinu obou pájecích zařízení je uvedena v *Tabulce 10*.

| Pájecí zařízení | Příkon (W) | Využití za rok (h) | Spotřeba za rok (kWh) | Cena tarifu (Kč/kWh) | Cena odběru (Kč/měsíc) | Celková cena za rok (Kč) |
|-----------------|------------|--------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|
| Mistral 260     | 3 000      | 64                 | 128                   | 1,6                  | 79                     | <b>1 153</b>             |
| ATF VP 400      | 3 900      | 120                | 446                   | 1,6                  | 79                     | <b>1 662</b>             |

*Tabulka 10. Náklady na elektřinu*

### 3.3.2.3 Osobní náklady

Za osobní náklady jsou považovány mzdy zaměstnanců, kteří pec obsluhují. Na obou zařízení provádí výzkum studenti bakalářského, magisterského nebo doktorského studia a ostatní zaměstnanci. Studenti bakalářského a magisterského studia mzdu nedostávají, hodinová mzda studentů doktorského studia je odhadnuta na 250,- Kč a ostatních zaměstnanců na 350,- Kč.

Na peci Mistral 260 pracují studenti bakalářského a magisterského studia přibližně 2/3 času, tj. 42,7 hodin. Ve zbylém času pracují s pecí studenti doktorského studia a ostatní zaměstnanci fakulty. Studenti doktorského studia přitom pracují s pecí 5/6 zbylého času, tedy 5/18 celkového času, tj. 17,8 hodin. Ostatní zaměstnanci s pecí pracují 1/18 celkového času, tj. 3,6 hodin.

U pájecího zařízení ATF VP 400 je předpoklad, že na něm výzkum budou provádět více než u předchozí pece především studenti magisterského a bakalářského studia a to 3/4 celkového času, tj. 90 hodin. Studenti doktorského studia na zařízení stráví 3/16 celkového času, tj. 22,5 hodin a ostatní zaměstnanci 1/16 celkového času, tj. 7,5 hodiny.

Celkové roční mzdy všech pracovníků pro obě pájecí zařízení jsou uvedeny v *Tabulce 11*.

|  | Práce (h/rok) | Mzda (Kč/hodina) | Mzda (Kč/rok) |
|--|---------------|------------------|---------------|
| <b>Mistral 260</b>                           |               |                  |               |
| Studenti bakalářského a magisterského studia | 42,7          | 0                | 0             |
| Studenti doktorského studia                  | 17,8          | 250              | 4 444         |
| Ostatní zaměstnanci                          | 3,6           | 350              | 1 244         |
| <b>Celková cena za mzdy</b>                  |               |                  | <b>5 689</b>  |

| <b>ATF VP 400</b>                            |              |     |       |
|--|--------------|-----|-------|
| Studenti bakalářského a magisterského studia | 90,0         | 0   | 0     |
| Studenti doktorského studia                  | 22,5         | 250 | 5 625 |
| Ostatní zaměstnanci                          | 7,5          | 350 | 2 625 |
| <b>Celková cena za mzdy</b>                  | <b>8 250</b> |     |       |

Tabulka 11. Osobní náklady

### 3.3.2.4 Náklady na revizi, údržbu a opravu

Revize funkčnosti u obou pájecích zařízení probíhá jednou za rok a její cena činí 700,- Kč.

Jedinou údržbou pece Mistral 260 je chemické čištění vnitřku a povrchu pece. K tomu jsou určeny speciální produkty na čištění, a to alkalický čistič vnitřků pájecích pecí a vln na vodní bázi pro ruční čištění tvrdých a starých zbytků Kolb G-50, který stojí 529,- Kč, a alkalický čistič povrchů pájecích pecí a vln na vodní bázi pro ruční čištění Kolb CF1 s cenou 454,- Kč. Tyto prostředky se kupují přibližně jednou za 3 roky. Čištění pece se provádí jednou za půl roku a mají ho na starost studenti doktorského studia, přičemž jedno čištění trvá zhruba půl hodiny.

Na zařízení pro pájení v parách lze použít stejné produkty na čištění, jako u pájecí pece. Čištění povrchu a vnitřku však musí probíhat častěji kvůli většímu usazování nečistot. Předpokládaná frekvence čištění je jednou za čtvrt roku a trvala by půl hodiny. Z důvodu častějšího čištění je nutnost kupovat zmiňované čisticí prostředky jednou za dva roky.

Co se týče nákladů na opravu, je Mistral 260 dle zkušeností málo poruchová, proto lze očekávat případnou poruchu v řádu let. V této práci je uvažována porucha jednou za dobu životnosti. Oprava větší poruchy poté může činit přibližně 5 000,- Kč.

Zařízení ATF VP 400 je řízeno vyvinutým algoritmem, který zajišťuje dokonalý a bezporuchový běh zařízení. Proto u něj porucha může nastat velmi ojediněle a v nákladech jí nebudeme uvažovat.

Pro přehlednost jsou veškeré náklady na revizi, údržbu a opravu pájecích zařízení zaznamenány v *Tabulce 12*.

|   | <b>Mistral 260</b> | <b>ATF VP 400</b> |
|---|--------------------|-------------------|
| Životnost zařízení (rok)                  | 15                 | 20                |
| Počet revizí za rok (ks)                  | 1                  | 1                 |
| Počet čištění za rok (ks)                 | 2                  | 4                 |
| Počet čističů Kolb G-50 za životnost (ks) | 5                  | 10                |
| Počet čističů Kolb CF1 za životnost (ks)  | 5                  | 10                |
| Cena jedné revize (Kč)                    | 700                | 700               |
| Cena jednoho čištění (Kč)                 | 125                | 125               |
| Cena čističe Kolb G-50 (Kč)               | 529                | 529               |
| Cena čističe Kolb CF1 (Kč)                | 454                | 454               |
| Cena opravy za životnost (Kč)             | 5 000              | –                 |

Tabulka 12. Náklady na revizi, údržbu a opravu

### 3.4 Celkové náklady pecí za jejich dobu životnosti

V této kapitole jsou shrnuty všechny náklady na průběžnou pájecí pec Mistral 260 a zařízení pro pájení v parách ATF VP 400. Následně je vyčíslena čistá současná hodnota, roční ekvivalentní peněžní tok a náklady na jeden experiment. Peněžní tok v nultém roce odpovídá nákupu pájecích zařízení a prostředků na čištění. V následujících letech je peněžní tok vyjádřen jako součet jednotlivých nákladů za elektřinu, mzdy, materiál, údržbu, revizi a opravy.

Ve výpočtu je uvažován každoroční procentuální nárůst cen všech položek. Procentuální nárůst elektřiny byl stanoven na 7,6 %, což je průměr ročních přírůstků cen elektřiny za posledních pět let. Vstupní údaje o ceně elektřiny byly převzaty z webových stránek společnosti *Kurzy.cz*, spol. s r.o. Náklady na mzdy mají ve výpočtu 5,7% přírůstek. I toto procento bylo stanoveno z průměrné hodnoty přírůstků mezd za posledních pět let. Údaje k výpočtu byly brány ze stránek *České tiskové kanceláře ČTK*. U nákladů na materiál, údržbu a opravu byl pro zjednodušení uvažován dle *Českého statistického úřadu*, na základě míry inflace vyjádřené přírůstkem průměrného ročního indexu spotřebitelských cen, procentuální nárůst 3,1 %. Nárůst ceny za údržbu má dvě složky, neboť se skládá z ceny za čisticí prostředky (nárůst 3,1 %) a ceny za obsluhu (nárůst 5,7 %).

Výsledné NPV, RCF a celkové náklady na jeden experiment obou pecí jsou uvedeny v *Tabulce 13*. Podrobnější rozpis všech nákladů v jednotlivých letech, které uvažujeme jako výdaje, je uveden v *Příloze 4 a Příloze 5*. Všechny hotovostní toky jsou nákladové, proto ve výpočtech není uvažováno znaménko mínus. S tím souvisí i fakt, že nebyly uvažovány odpisy pecí, které ovlivňují zisk subjektu, proto zde pro usnadnění zisk zanedbáváme. Diskontní sazba byla uvažována 3 %.

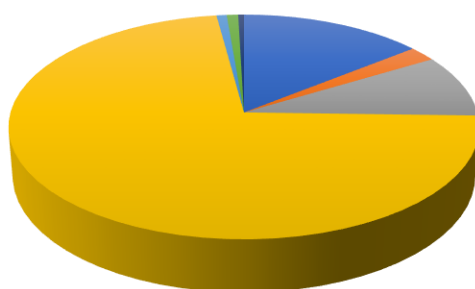
| Pájecí zařízení | NPV (Kč)  | RCF (Kč) | Experimenty (ks) | Náklady na experiment (Kč) |
|-----------------|-----------|----------|------------------|----------------------------|
| Mistral 260     | 1 232 258 | 103 222  | 8                | 12 903                     |
| ATF VP 400      | 2 936 138 | 197 355  | 10               | 19 735                     |

Tabulka 13. Výsledné NPV, RCF a náklady na experiment

Celková hodnota nákladového RFC pece Mistral 260 činí 103 222,- Kč a RCF zařízení na pájení v parách 197 355,- Kč. Na jeden experiment výše nákladů u horkovzdušné pece činila 12 903,- Kč a u zařízení na pájení v parách 19 735,- Kč. Z výsledků je tedy zřejmé, že nižší náklady jsou na pec Mistral 260. Rozdíl RCF je 94 133,- Kč a rozdíl v nákladech na jeden experiment je však výrazně nižší, a to 6 832,- Kč. Tato hodnota je směrodatnější, neboť je zde uvažováno to, že publikační potenciál pájecího zařízení ATF VP 400 je výrazně vyšší a na peci bude s největší pravděpodobností provedeno vyšší množství experimentů. Proto je otázkou, zda je výhodnější investovat do méně nákladné pece, jejíž starší a spolehlivá verze se již na katedře nachází, anebo do pece s větším využitím a exkluzivnějším způsobem pájení.

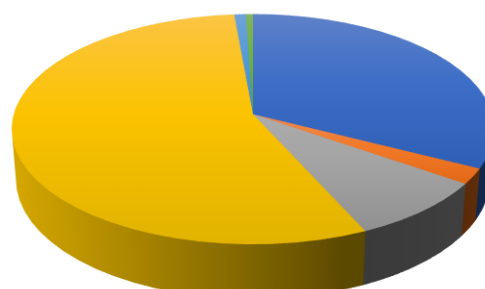
Získané výsledky jsou velmi ovlivněny vstupními parametry. V Grafu 9 a Grafu 10 je znázorněno rozložení podílů jednotlivých nákladů na celkových nákladech. Je zřejmé, že u pece Mistral 260 celkové náklady nejvíce ovlivňují náklady na materiál. U pájecího zařízení ATF VP 400 celkové náklady ovlivňují také nejvíce náklady na materiál, avšak jejich podíl je menší než u pájecí pece, a to kvůli tomu, že celkové náklady výrazně ovlivňuje počáteční investice.

V následující kapitole jsou uvedeny vytvořené scénáře, které by teoreticky mohly nastat, pokud se změní některý ze vstupních parametrů. Následně je uvedeno, jak tato změna ovlivní celkové náklady.



■ investice ■ elektřina ■ mzdy  
 ■ materiál ■ údržba ■ revize  
 ■ oprava

Graf 9. Rozložení nákladů u pece Mistral 260



■ investice ■ elektřina ■ mzdy  
 ■ materiál ■ údržba ■ revize

Graf 10. Rozložení nákladů u pece ATF VP 400



## 3.5 Citlivostní analýza nákladů

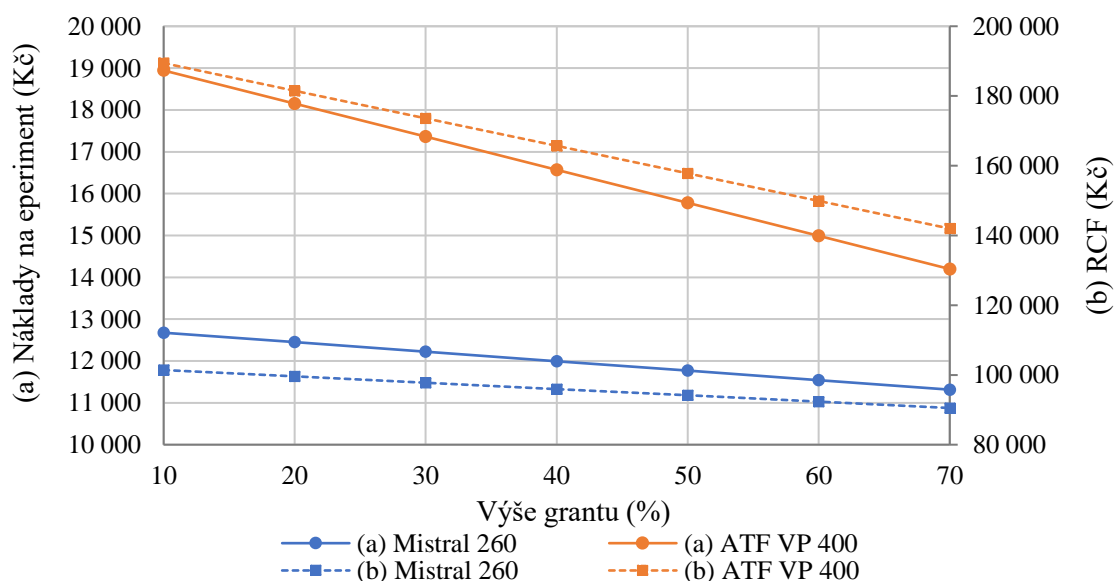
### 3.5.1 Změna investičních nákladů

Tato kapitola je zaměřena na to, jak se náklady na pájecí zařízení mohou změnit, pokud se změní některé vstupní parametry. Velikost celkových nákladů na experiment je nejvíce ovlivňována výší investice. Proto změnu vstupních parametrů budeme zvažovat právě u nákladů na pořízení zařízení.

Investiční náklady na pájecí zařízení se mohou změnit, pokud Katedra technologií dostane na zařízení dotaci ve formě grantu. V následujícím *Grafu 11* je znázorněno, jak se celkové náklady na jeden experiment pájecích zařízení změní s různě velkým grantem. Výše grantu je vždy stanovena procentem z původní ceny.

Pro analýzu bylo uvažováno sedm hladin procentuální výše grantu, a to v rozmezí 10–70 %. Z grafu je zřejmé, že obě křivky nákladů s rostoucím grantem klesají. Znatelnější pokles je však u pájecího zařízení ATF VP 400. Pokud by byla obě pájecí zařízení dotována ve výši 70 % z původní ceny, je rozdíl mezi náklady na jeden experiment pouze 2 883,- Kč.

Celkové RCF pecí je zobrazeno v *Grafu 11*. Z grafu je zřejmý rozdíl mezi křivkami RCF a náklady na experiment. Odlišný sklon křivek je dán různými měřítky na svislých osách. Oproti nákladům na experiment je rozdíl RCF při nejvyšší uvažované dotaci 51 460 Kč.

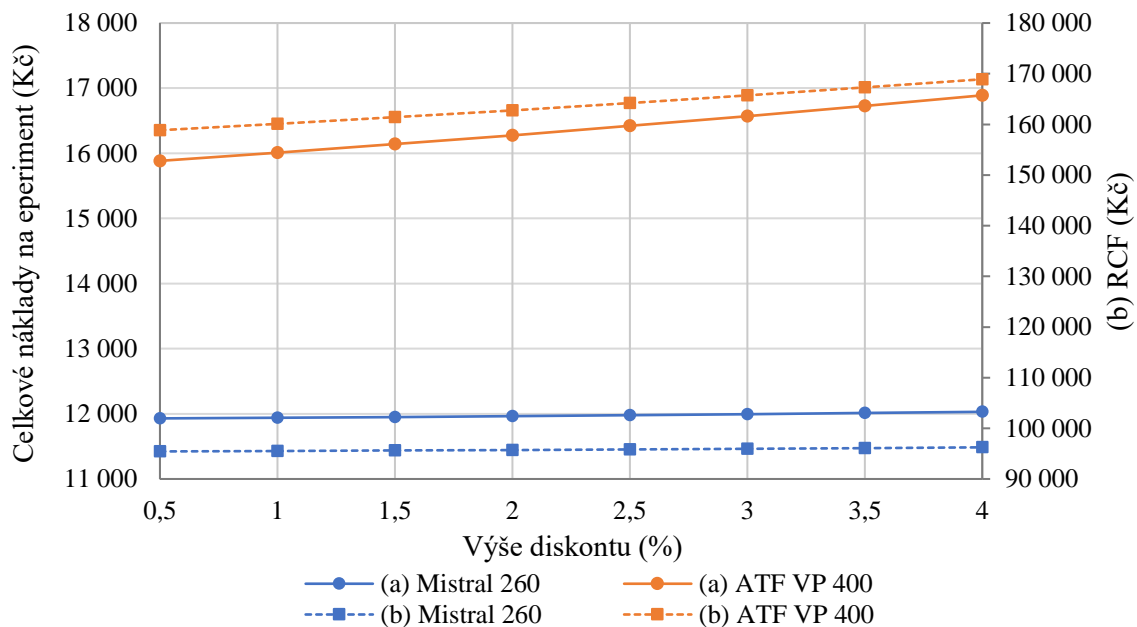


Graf 11. Závislost nákladů na experimentu na grantu

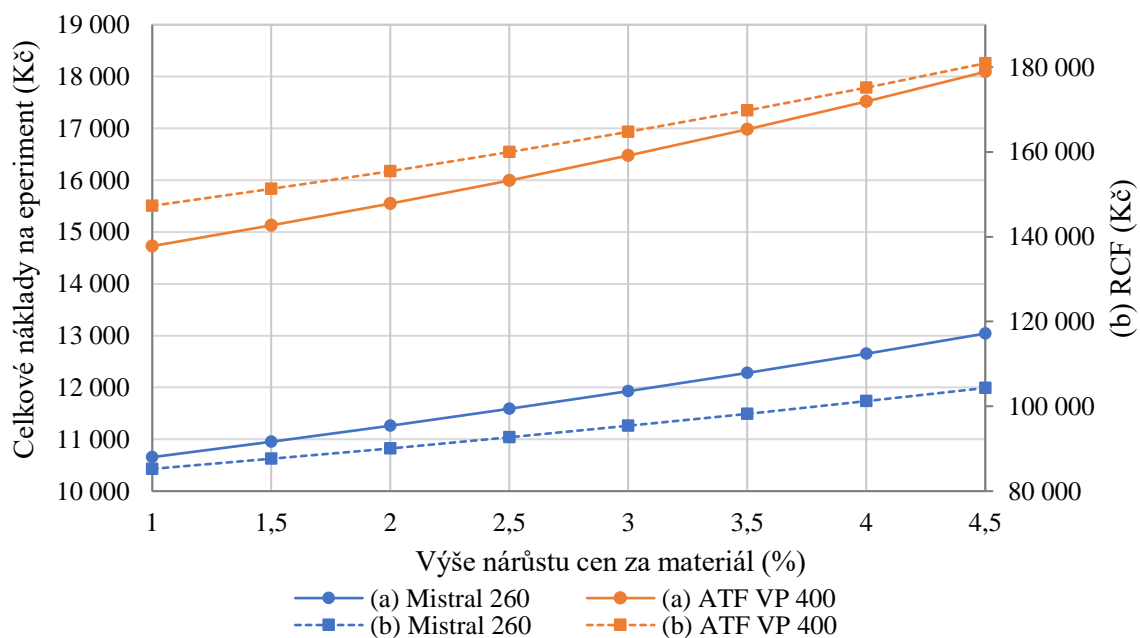
Stanovení přesné výše grantu, kterou by pájecí zařízení mohly teoreticky získat je velmi obtížné. V následující kapitole je proto proveden zjednodušený předpoklad, že by výše grantu mohla dosahovat 40 % z původní ceny. Pro tuto hladinu je zhotovena citlivostní analýza, ve které jsou zpracovány proměnné parametry diskont, výše ročního procentuálního přírůstku ceny materiálů a mezd.

### 3.5.2 Citlivostní analýza na dotovaná zařízení

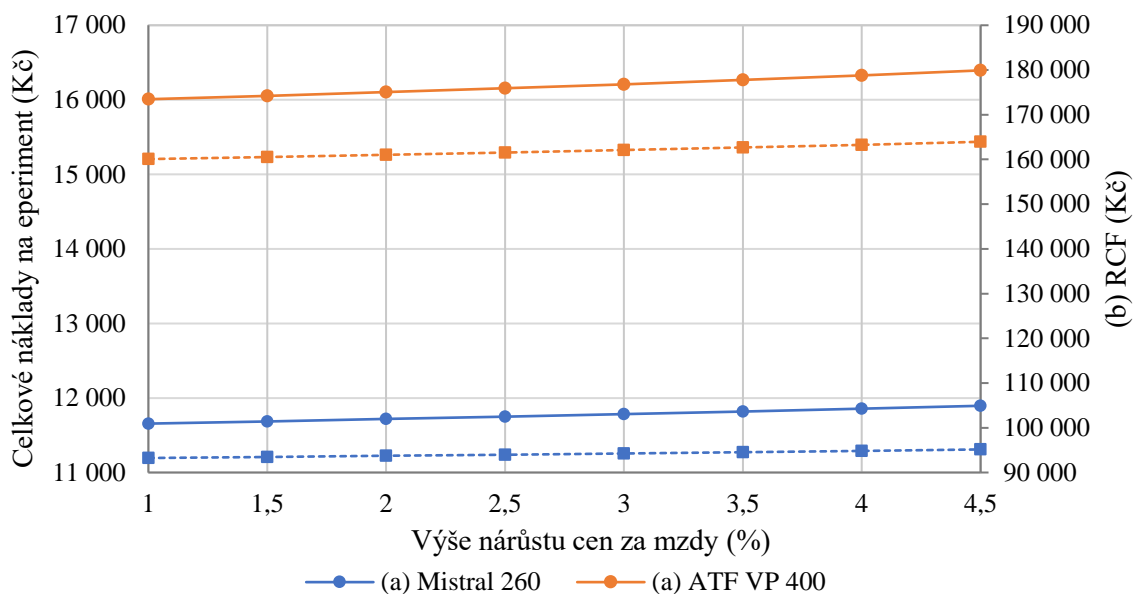
Předpokládáme, že Katedra technologií by na nové pájecí zařízení mohla dostat grant ve výši 40 % z původní ceny. V následujících *Grafech 12–14* je znázorněno, jak je velikost nákladů na jeden experiment ovlivněná změnou diskontu a ročním přírůstek ceny materiálů a mezd. V grafu jsou jako v předchozím případě pro porovnání zobrazena celková RCF.



Graf 13. Závislost nákladů na experiment na diskontu



Graf 12. Závislost nákladů na experiment na materiálu



Graf 14. Závislost na experiment na mzdách

V Grafu 12 je vidět, že s rostoucím diskontem rostou celkové náklady na experiment. RCF pájecího zařízení ATF VP 400 roste mnohem výrazněji než u pájecí pece Mistral 260. Z toho je zřejmé, že náklady na experiment v horkovzdušné peci nejsou skoro vůbec závislé na výši diskontu, a naopak náklady na experiment v peci na pájení v parách je diskontem ovlivněno mnohem znatelněji.

Graf 13 znázorňuje závislost nákladů na experiment a RCF pecí na nákladech na materiál, přesněji jak moc se tyto náklady zvýší, zvýší-li se procentuální roční nárůst ceny materiálu. Zde je naproti předchozí situaci nárůst nákladů s nárůstem cen za materiál podstatně vyšší. Důvodem je, že náklady za materiál tvoří podstatnou část celkových nákladů, a proto se jejich změna výrazně odrazí na celkových nákladech.

Pokud bychom uvažovali změnu nákladů na mzdy, která je zobrazena v Grafu 14, celkové náklady na materiál by to u obou pecí nijak zvlášť neovlivnilo. Náklady na mzdy jsou totiž na rozdíl od nákladů na materiál jen malou částí nákladů celkových, a proto není jejich změna až tak podstatná.

Ostatní náklady na elektřinu, revizi, údržbu a opravu představují ještě menší část, než jsou náklady na mzdy, proto u těchto nákladů nemá smysl citlivostní analýzu provádět.

## 4 Závěr práce

Cílem této bakalářské práce bylo analyzovat vybrané třísložkové bezolovnaté pájecí slitiny na bázi cínu a bismutu s přidaným třetím prvkem galliem. Práce byla rozdělena na tři části – část rešeršní, experimentální a ekonomickou.

V první části byl čtenář obeznámen se základními pojmy týkající se pájení. Byl zde vysvětlen pojem pájení, typy pájení, typy tavidel, vlastnosti prvků v pájkách, typy bezolovnatých pájek a princip fázových diagramů.

Provedená analýza spočívala v tom, že se udržovalo konstantní procentuální zastoupení cínu, které bylo 40 %, a ověřovalo se, jak se slitině změní vlastnosti s měnícím se zastoupením bismutu a gallia. Výsledky se poté porovnály s naměřenými hodnotami u eutektické slitiny Bi58Sn42, což je jedna z nejčastěji používaných bezolovnatých pájecích slitin. Cílem tohoto experimentu bylo tedy najít ideální procentuální zastoupení gallia, které by dokázalo vylepšit vlastnosti bezolovnaté pájecí slitiny na bázi cínu a bismutu.

Na začátku experimentální části byly popsány všechny metody, pomocí kterých byly slitiny analyzovány. Analýza byla primárně provedena z hlediska termodynamického, tzn. u pájecích slitin byla zkoumána teplota tání a tuhnutí. K tomuto měření byla použita diferenciální skenovací kalorimetrie. Následně byla u těchto vzorků provedena pomocí mikrotvrdoměru Vickersova zkouška tvrdosti, a nakonec byla na elektronovém mikroskopu prozkoumána struktura a složení slitin.

Pomocí termální analýzy bylo ověřeno, že pokud se přidá do bismut-cínové slitiny gallium v dostatečné míře, sníží se teplota tání a tuhnutí. Když se do bismut-cínové slitiny přidalo větší množství gallia o 1 %, teplota tání překvapivě oproti eutektiku vzrostla na 144 °C. Avšak s dalším přidáním gallia, se teplota tání výrazně snižovala. S 3 % gallia se teplota tání snížila na 129 °C. S dalším přidáním gallia teplota tání stále klesala, a to při zastoupení gallia 50 % až na 34 °C. Z měření vyplývá, že teoreticky by slitina byla využitelná při struktuře, ve které je gallium v zastoupení do cca 30 %. Vickersova zkouška tvrdosti potvrdila, že přidáním určitého malého procenta gallia se zvýší tvrdost slitiny oproti eutektické slitině, jejíž tvrdost vyšla 27,4 kgf/mm. Nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena u slitiny Bi59Sn40Ga1, a to 31,4 kgf/mm. Naopak nejnižší tvrdost měla slitina Bi30Sn40Ga30, její průměrná tvrdost byla 6,8 kgf/mm. Z toho lze usoudit, že příliš velké procentuální zastoupení gallia tvrdost slitiny oproti eutektiku sníží. Ze snímků pořízených na mikroskopu bylo nakonec zjištěno, že nejideálnější mísení prvků proběhlo u slitiny Bi59Sn40Ga1. Oproti tomu u slitin s procentuálním zastoupením gallia 10 % a 30 % dochází k malé rozpustnosti prvků a vzniku velkých prohlubin, které jsou dány tepelnou roztažností.

Z naměřených hodnot vyplývá, že nejlépe v analýzách bezolovnatých slitin na bázi cínu a bismutu s různým procentuálním zastoupením gallia dopadla slitina Bi59Sn40Ga3, u které byla

naměřena nejideálnější teplota tání a tvrdost. Na základě těchto výsledků můžeme tvrdit, že se tato slitina hodí pro měkké pájení v oblasti elektrotechniky, kde je potřeba nízké teploty tání, díky čemuž jsou méně namáhané součástky a zároveň se tím šetří spotřeba energie. Další důležitou vlastností je odolnost slitiny vůči poškození průnikem cizích těles, tedy dostatečná tvrdost. Avšak příliš vysoká tvrdost může znamenat i vyšší křehkost materiálu. Otázkou tedy zůstává, zda by tato slitina obstála i v dalších mechanických zkouškách a zda by nebyla příliš křehká.

Výsledky tohoto experimentu měly být prezentovány na mezinárodní studentské konferenci *Poster 2020*. Vzhledem k mimořádné pandemické situaci způsobené COVID-19 a v návaznosti na přijatá opatření vlády České republiky, byla konference zrušena. Výsledky práce proto budou s největší pravděpodobností prezentovány na této konferenci příští rok.

Analýza těchto slitin má velký potenciál, který lze využít ještě pro další práce. Zajímavé by bylo provést u těchto slitin například mechanické zkoušky.

V ekonomické části byly vyhodnoceny náklady na pořízení a provoz dvou odlišných pájecích zařízení – pájecí pece Mistral 260 a pájecího zařízení ATF VP 400. S veškerými náklady bylo počítáno jako s okamžitými výdaji. Celkové náklady se skládaly z počáteční investice, nákladů na materiál, elektřinu, údržbu, revizi, opravu a mzdy neboli osobních nákladů. U všech nákladů bylo počítáno s procentuálním ročním nárůstem cen, aby byl zahrnut aspekt cenové inflace.

U pájecí pece Mistral 260 celková výše NPV vyšla 1 232 258,- Kč a výše RCF 103 222,- Kč. U pájecího zařízení ATF VP 400 vyšly tyto hodnoty vyšší, NPV 2 936 138,- Kč a RCF 197 355,- Kč. Hlavním důvodem toho rozdílu je počáteční investice pecí. Pájecí zařízení ATF VP 400 umožňuje více speciální metodu pájení, z tohoto důvodu lze předpokládat, že by se na peci dalo v budoucnu zhotovit více různorodých experimentů než na peci horkovzdušné, jejíž starší verze již na Katedře technologií je. V nákladech bylo proto počítáno s tím, že by se pomocí pájecí horkovzdušné pece Mistral 260 zhotovilo za rok 8 experimentů a v peci pro pájení v parách ATF VP 400 10 experimentů. Pro zjednodušení porovnání bylo předpokládáno, že se jedná o stejný typ experimentu, přičemž jako referenční experiment byl použit již proběhlý experiment mého kolegy. Vyšší počet experimentů znamená i vyšší spotřebu materiálů, a proto byly pro získání směřodatnějšího porovnatelného výsledku vypočítány náklady na jeden experiment. Tyto náklady u pájecí horkovzdušné pece vyšly 12 903,- Kč a u pece na pájení v parách 19 735,- Kč, rozdíl nákladů na jeden experiment tedy činí 6 832,- Kč. Je však pravděpodobné, že vzhledem k vyššímu počtu experimentů bude na peci ATF VP 400 vytvořeno více vědeckých prací, které budou navíc k větší unikátnosti technologie lépe hodnocené. Tyto vědecké práce jsou pro katedru přínosné, protože z těchto vědeckých výstupů katedra získává peněžní prostředky. Proto by dle mého názoru měla katedra investovat právě do této pece.

Je zřejmé, že náklady na pájecí zařízení velmi ovlivňují vstupní parametry, jako je například výše diskontu a nárůst cen. Z tohoto důvodu byla v práci též zhotovena citlivostní

analýza, ve které jsou uvedeny scénáře, které by teoreticky mohly nastat, pokud se změní některý ze vstupních parametrů. V citlivostní analýze byla zkoumána závislost nákladů na jeden experiment a celkové RCF na výši získaného grantu. V druhé části byla pro jednu hladinu grantu pozorována změna nákladů na experiment a RCF v závislosti na diskontu, výši ročního procentuálního přírůstku ceny materiálů a mezd. Nejvíce se změna projevila u změny procentuálního ročního navýšení cen, a to z toho důvodu, že náklady na materiál tvoří největší část celkových nákladů u obou pecí.

## Zdroje

- [1] KOBLÍŽEK, V. Měkké pájení v elektronice. *moodle.fel.cvut.cz* [online]. [vid. 2019-10-29]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=3883>
- [2] PIETRIKOVÁ, A., J. ĎURIŠIN a P. MACH. *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. 1.vydání. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [3] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice*. 1.vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [4] MACH, Pavel. Pájení v elektronice. *moodle.fel.cvut.cz* [online]. [vid. 2019-11-01]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/186480/mod\\_resource/content/1/Pajeni.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/186480/mod_resource/content/1/Pajeni.pdf)
- [5] WELSCH, Alden. Surface Mount Drag-Soldering Guide for the Electronics Technician. *classes.engineering.wustl.edu* [online]. [vid. 2019-11-02]. Dostupné z: [https://classes.engineering.wustl.edu/ese205/core/images/0/0f/Soldering\\_Technician%27s\\_Refresh.pdf](https://classes.engineering.wustl.edu/ese205/core/images/0/0f/Soldering_Technician%27s_Refresh.pdf)
- [6] LEROY OLSON, David, Thomas A. SIEWERT, Stephen LIU a Glen R. EDWARDS. *Welding, Brazing and Soldering*. Massachusetts Institute of Technology: ASM International, 2019. 6.série. ISBN 978-1-62708-173-3.
- [7] BATRONIX GMBH & CO. KG. JBC C245-754. *batronix.com* [online]. 2020 [vid. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://www.batronix.com/shop/soldering/soldering-stations/jbc/DIT-2D.html>
- [8] HAKKO CORPORATION. Hikaru's diary on learning to solder STORY 9. *hakko.com* [online]. [vid. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.hakko.com/english/hikaru/pages/story9.html>
- [9] P2J TECHNOLOGY S.R.O. Průběžná pájecí pec Mistral 260. *p2jtechnology.cz* [online]. 2014 [vid. 2019-12-25]. Dostupné z: <https://www.p2jtechnology.cz/produkty/smt-montaz/pajeci-pece-pajeni-vlnou/prubezna-pajeci-pec-mistral-260/>
- [10] URBAN, Václav. Laserové selektivní pájení v elektronice | PBT. *www.pbt.cz* [online]. 2017 [vid. 2019-11-06]. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/clanky/laserove-selektivni-pajeni-v-elektronice>
- [11] ABTEW, Mulugeta a Guna SELVADURAY. Lead-free Solders in Microelectronics. *Materials Science and Engineering: R: Reports* [online]. 2000, **27**(5), 95–141. ISSN 0927-796X. Dostupné z: doi:10.1016/S0927-796X(00)00010-3
- [12] SUGANUMA, Katsuaki. Advances in lead-free electronics soldering. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* [online]. 2001, **5**(1), 55–64. ISSN 1359-0286. Dostupné z: doi:10.1016/S1359-0286(00)00036-X
- [13] ODBOR 31200. Základní informace k problematice RoHS | MPO. *spektrometry.cz* [online]. 14. květen 2019 [vid. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/rohs-elektrozarizeni/zakladni-informace-k-problematice-rohs--158558/>

- [14] GANESAN, Sanka a Michael PECHT. *Lead-free Electronics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. ISBN 978-0-470-00779-2.
- [15] LAU, John H., C.P. WONG, Ning-Cheng LEE a Shi-Wei Ricky LEE. *Electronics Manufacturing: With Lead-Free, Halogen-Free, and Conductive-Adhesive Materials*. 1.vydání. New York, USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2003. ISBN 978-0-07-138624-1.
- [16] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. Nauka o materiálu, 1. ISBN 80-7204-283-1.
- [17] ASKELAND, Donald R. a P. Fulay PRADEEP. *Essentials of Materials Science & Engineering*. druhé vydání. Massachusetts, USA: Cengage Learning, 2009. ISBN 978-0-495-43850-2.
- [18] LEITNER, J. a P. VOŇKA. *Termodynamika materiálů*. 1.vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 1992. ISBN 80-7080-167-0.
- [19] MATĚJEC, Vlastimil. Fázové diagramy kondenzovaných systémů se třemi složkami. *ufe.cz* [online]. 2007 [vid. 2020-03-29]. Dostupné z: [https://www.ufe.cz/sites/default/files/matejec/prednaska-7-navody\\_k\\_laboratornim\\_cvicenim.pdf](https://www.ufe.cz/sites/default/files/matejec/prednaska-7-navody_k_laboratornim_cvicenim.pdf)
- [20] SEDMIDUBSKÝ, D. a M. NEVŘIVA. *VÝPOČTY FÁZOVÝCH ROVNOVÁH A KONSTRUKCE FÁZOVÝCH DIAGRAMŮ* [online]. Praha, 2004 [vid. 2020-04-05]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav anorganické chemie. Dostupné z: [https://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2004\\_14Sedmidubsky.pdf](https://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2004_14Sedmidubsky.pdf)
- [21] SETSYS EVOLUTION TGA-DTA/DSC. <https://www.setaram.com/> [online]. [vid. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://www.setaram.com/setaram-products/thermal-analysis/simultaneous-thermogravimetry-differential-scanning-calorimetry-differential-thermal-analysis/setsys-evolution-tga-dtadsc/>
- [22] KLOUŽKOVÁ, A, P ZEMENOVÁ, J KLOUŽEK a W PABST. *Termická analýza* [online]. Praha, 2012 [vid. 2019-12-08]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Dostupné z: <http://tresen.vscht.cz/sil/sites/default/files/Termick%C3%A1%20anal%C3%BDza.pdf>
- [23] MATOUŠKOVÁ, Eliška. *Termická a mikrostrukturní analýza slitiny bezolovnaté pájky* [online]. Brno, 2017 [vid. 2020-04-04]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Vít Jan, Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/67363/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- [24] EMCO-TEST PRÜFMASCHINEN GMBH. DuraScan G5. *emcotest.com* [online]. 2020 [vid. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://www.emcotest.com/en/products-services/hardness-testing-machines/durascan-g5/durascan-50-g5-1379/>
- [25] PEDERGNANA, Antonella, Andreu OLLÉ a Adrian A. EVANS. A new combined approach using confocal and scanning electron microscopy to image surface modifications on quartzite. *Journal of Archaeological Science: Reports* [online]. 2020, **30**, 102237. ISSN 2352-409X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jasrep.2020.102237
- [26] THERMO FISHER SCIENTIFIC INC. Phenom ProX Desktop SEM. *discover.phenom-world.com* [online]. [vid. 2020-04-04]. Dostupné z: [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/2005984/Offers/Spec\\_Sheet/phenom-desktop-sem-spec-sheet-prox.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/2005984/Offers/Spec_Sheet/phenom-desktop-sem-spec-sheet-prox.pdf)



- [27] MIKULČÁK, Jiří, Bohdan KLIMEŠ, Jaromír ŠIROKÝ, Václav ŠŮLA a František ZEMÁNEK. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*. 3.vydání. Praha: Prometheus, 1997. ISBN 80-85849-84-4.
- [28] ASSCON VAPOR PHASE TECHNOLOGY. Quicky 300. *amtest-group.pl* [online]. [vid. 2019-12-27]. Dostupné z: [http://www.amtest-group.pl/files/Vapor%20Phase%20Soldering/asscon/ASC\\_Q300\\_E\\_131107.pdf](http://www.amtest-group.pl/files/Vapor%20Phase%20Soldering/asscon/ASC_Q300_E_131107.pdf)
- [29] M. LAUENSTEIN AG. Dampfphasenlötanlage Dampfphasenlötanlage ATF VP400. *lauenstein.ch* [online]. [vid. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.lauenstein.ch/ATF-VP-400-D.pdf>
- [30] KUČERKOVÁ, Blanka. Kritéria ekonomické efektivity. *moodle.fel.cvut.cz* [online]. [vid. 2019-12-28]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/225801/mod\\_resource/content/1/Krit%C3%A9ria%20ekonomick%C3%A9%20efektivnosti.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/225801/mod_resource/content/1/Krit%C3%A9ria%20ekonomick%C3%A9%20efektivnosti.pdf)
- [31] CFI EDUCATION INC. Net Present Value (NPV) - - Definition, Examples, How to do NPV Analysis. *corporatefinanceinstitute.com* [online]. 2020 [vid. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/valuation/net-present-value-npv/>
- [32] THE BUSINESS PROFESSOR, LLC. *Retained Cash Flow – Definition* [online]. 2020 [vid. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://thebusinessprofessor.com/knowledge-base/retained-cash-flow-definition/>

## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1. Správné provedení pájených spojů [1] .....   | 9  |
| Obrázek 2. Dvouvlňové pájení [4] .....  | 10 |
| Obrázek 3. Pájení vlečením [7] .....  | 11 |
| Obrázek 4. Pájení ponorem [8] .....   | 11 |
| Obrázek 5. Pájení ohřevem infračervenými zářiči [4] .....                                     | 11 |
| Obrázek 6. Pájení ohřevem kondenzací par [4] .....  | 12 |
| Obrázek 7. Eutektický typ diagramu [2] .....  | 18 |
| Obrázek 8. Peritektický typ diagramu [2] .....  | 18 |
| Obrázek 9. Ternární diagram v trojúhelníkovém provedení pro ternární směs M [19] .....        | 19 |
| Obrázek 10. Rovnováha dvou fází v ternárním systému [19] .....                                | 20 |
| Obrázek 11. Výbrusy a) Bi58Sn42, Bi59Sn40Ga1, Bi57Sn40Ga3 b) Bi50Sn40Ga10, Bi30Sn40Ga30 ..... | 22 |
| Obrázek 12. Přístroj SETSYS EVOLUTION TGA-DTA/DSC [21] .....                                  | 23 |
| Obrázek 13. Průřez přístrojem [21] .....  | 23 |
| Obrázek 14. Kalíšky a aparát na jejich uchycení [21] .....                                    | 24 |
| Obrázek 15. Příklad výstupu z DSC [23] .....  | 24 |
| Obrázek 16. Příklad Vickersovy zkoušky na slitině Bi59Sn40Ga1 .....                           | 25 |
| Obrázek 17. Mikrotvrdoměr DuraScan G5 [24] .....  | 26 |
| Obrázek 18. Elektronový mikroskop Phenom ProX Desktop [26] .....                              | 27 |
| Obrázek 19. Mikrostruktura a) Bi58Sn42, b) Bi59Sn40Ga1, c) Bi57Sn40Ga3 .....                  | 34 |
| Obrázek 20. Mikrostruktura d) Bi50Sn40Ga10 e) Bi30Sn40Ga30 .....                              | 35 |
| Obrázek 21. Umístění linescanů a) Bi58Sn42, b) Bi59Sn40Ga1, c) Bi57Sn40Ga3 .....              | 35 |
| Obrázek 22. Umístění linescanů d) Bi50Sn40Ga10 e) Bi30Sn40Ga30 .....                          | 35 |
| Obrázek 23. Pec Mistral 260 [9] .....   | 40 |
| Obrázek 24. Pájecí zařízení pro pájení v parách ATF VP 400 [29] .....                         | 40 |

## Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1. Tavidla pro měkké pájení [3] .....                                 | 13 |
| Tabulka 2. Dvojsložkové bezolovnaté pájky [14] .....                          | 15 |
| Tabulka 3. Třísložkové bezolovnaté pájky [14] .....                           | 17 |
| Tabulka 4. Teploty tání a tuhnutí základních prvků a eutektické slitiny ..... | 28 |
| Tabulka 5. Teploty tání a tuhnutí analyzovaných třísložkových pájek .....     | 28 |
| Tabulka 6. Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků .....                             | 31 |
| Tabulka 7. Změřené procentuální zastoupení prvků ve slitinách .....           | 33 |
| Tabulka 8. Investiční náklady .....   | 42 |
| Tabulka 9. Náklady na materiál .....  | 44 |
| Tabulka 10. Náklady na elektřinu .....  | 45 |
| Tabulka 11. Osobní náklady .....  | 46 |
| Tabulka 12. Náklady na revizi, údržbu a opravu .....                          | 47 |
| Tabulka 13. Výsledné NPV, RCF a náklady na experiment .....                   | 48 |

## Seznam grafů

|   |    |
|---|----|
| Graf 1. Závislost tepelného toku na teplotě pro Bi57Sn40Ga3.....    | 29 |
| Graf 2. Termická analýza základních stavebních prvků slitin .....   | 29 |
| Graf 3. Termická analýza tříslučkových pájek.....                   | 30 |
| Graf 4. Krabicové diagramy naměřené tvrdosti zkoumaných slitin..... | 32 |
| Graf 5. Linescan a) Bi58Sn42.....                                   | 36 |
| Graf 6. Linescany b) Bi59Sn40Ga1, c) Bi57Sn40Ga3 .....              | 36 |
| Graf 7. Linescany d) Bi50Sn40Ga10 e) Bi30Sn40Ga30 .....             | 36 |
| Graf 8. Pseudobinární diagram BiSn40Ga.....                         | 37 |
| Graf 9. Rozložení nákladů u pece Mistral 260.....                   | 48 |
| Graf 10. Rozložení nákladů u pece ATF VP 400.....                   | 48 |
| Graf 11. Závislost nákladů na experiment na grantu .....            | 49 |
| Graf 12. Závislost nákladů na experiment na materiálu.....          | 50 |
| Graf 13. Závislost nákladů na experiment na diskontu.....           | 50 |
| Graf 14. Závislost na experiment na mzdách.....                     | 51 |

## Přílohy

| Měřený vzorek                        | Bi58Sn42    | Bi59Sn40Ga1 | Bi57Sn40Ga3 | Bi50Sn40Ga10 | Bi30Sn40Ga30 |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| HV 0,05/ HV 1 (kgf/mm <sup>2</sup> ) | 26,5        | 30,3        | 34,8        | 13,5         | 5,9          |
|                                      | 28,0        | 30,8        | 32,6        | 13,3         | 4,8          |
|                                      | 27,1        | 30,8        | 30,1        | 13,0         | 5,7          |
|                                      | 28,0        | 28,9        | 31,6        | 13,5         | 6,0          |
|                                      | 27,0        | 33,0        | 33,2        | 12,4         | 8,0          |
|                                      | 26,6        | 32,4        | 32,3        | 12,5         | 7,3          |
|                                      | 25,7        | 33,7        | 33,1        | 14,2         | 8,2          |
|                                      | 27,8        | 33,2        | 29,0        | 13,7         | 6,7          |
|                                      | 26,0        | 37,2        | 30,6        | 14,4         | 7,7          |
|                                      | 25,5        | 33,5        | 30,8        | 13,2         | 8,0          |
|                                      | 26,8        | 30,6        | 31,8        | 13,4         | 7,5          |
|                                      | 29,5        | 30,4        | 32,1        | 13,3         | 7,5          |
|                                      | 27,4        | 32,1        | 29,6        | 13,7         | 6,0          |
|                                      | 27,2        | 32,2        | 30,4        | 13,9         | 6,6          |
|                                      | 27,9        | 30,5        | 29,7        | 13,4         | 6,4          |
|                                      | 28,5        | 32,8        | 26,5        | 13,8         | 6,5          |
|                                      | 26,0        | 31,2        | 26,8        | 15,8         | 6,7          |
|                                      | 28,4        | 30,1        | 28,9        | 14,8         | 6,2          |
|                                      | 29,0        | 27,1        | 29,4        | 13,7         | 7,1          |
| 29,2                                 | 28,0        | 32,1        | 15,6        | 7,3          |              |
| ØHV (N/m <sup>2</sup> )              | <b>27,4</b> | <b>31,4</b> | <b>30,8</b> | <b>13,8</b>  | <b>6,8</b>   |

Příloha 1. Naměřené hodnoty tvrdosti slitin

| Měřený vzorek                | Sn          | Bi          |
|------------------------------|-------------|-------------|
| HV0,1 (kgf/mm <sup>2</sup> ) | 13,5        | 13,1        |
|                              | 12,6        | 14,6        |
|                              | 12,9        | 14,4        |
|                              | 12,0        | 13,8        |
|                              | 13,3        | 14,0        |
|                              | 13,7        | 12,8        |
|                              | 12,6        | 12,5        |
|                              | 13,0        | 13,0        |
|                              | 12,6        | 15,9        |
| 13,3                         | 16,2        |             |
| ØHV (N/m <sup>2</sup> )      | <b>13,0</b> | <b>14,0</b> |

Příloha 2. Naměřené hodnoty tvrdosti stavebních prvků

| Slitina                                  | Bi58Sn42     |              | Bi59Sn40Ga1  |              |              | Bi57Sn40Ga3  |              |             |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Prvek                                    | Sn           | Bi           | Sn           | Bi           | Ga           | Sn           | Bi           | Ga          |
| Procentuální zastoupení prvku ve slitině | 37,72        | 62,28        | 37,25        | 62,56        | 0,19         | 36,24        | 62,41        | 1,35        |
|  | 38,35        | 61,65        | 37,55        | 61,49        | 0,96         | 36,45        | 61,75        | 1,80        |
|  | 40,48        | 59,52        | 35,25        | 63,80        | 0,95         | 38,21        | 60,87        | 0,92        |
|  | 40,83        | 59,17        | 35,88        | 62,85        | 1,27         | 38,47        | 59,90        | 1,63        |
|  | 40,23        | 59,77        | 33,91        | 64,58        | 1,51         | 35,77        | 62,66        | 1,57        |
|  | 41,45        | 58,55        | 36,16        | 62,54        | 1,30         | 35,46        | 62,81        | 1,73        |
|  | -            | -            | 37,30        | 61,55        | 1,15         | 33,74        | 64,85        | 1,41        |
|  | -            | -            | 39,99        | 59,43        | 0,58         | 29,25        | 69,49        | 1,26        |
|  | -            | -            | 36,00        | 63,13        | 0,87         | -            | -            | -           |
| Ø hodnota                                | <b>39,84</b> | <b>60,16</b> | <b>36,59</b> | <b>62,43</b> | <b>0,98</b>  | <b>35,45</b> | <b>63,09</b> | <b>1,46</b> |
| Slitina                                  | Bi50Sn40Ga10 |              |              | Bi30Sn40Ga30 |              |              |              |             |
| Prvek                                    | Sn           | Bi           | Ga           | Sn           | Bi           | Ga           |              |             |
| Procentuální zastoupení prvku ve slitině | 7,09         | 90,59        | 2,32         | 43,16        | 43,96        | 12,88        |              |             |
|  | 9,57         | 87,98        | 2,45         | 43,58        | 44,10        | 12,32        |              |             |
|  | 10,59        | 84,49        | 4,92         | 35,79        | 48,99        | 15,22        |              |             |
|  | 13,00        | 83,38        | 3,62         | 33,27        | 56,38        | 10,35        |              |             |
|  | 15,77        | 80,22        | 4,01         | 35,71        | 52,53        | 11,76        |              |             |
|  | 9,17         | 85,67        | 5,16         | 42,78        | 45,05        | 12,17        |              |             |
|  | 15,05        | 81,38        | 3,57         | 40,83        | 48,49        | 10,68        |              |             |
|  | 55,65        | 26,44        | 17,91        | 47,51        | 24,21        | 28,28        |              |             |
|  | 46,08        | 48,12        | 5,80         | 32,55        | 55,17        | 12,28        |              |             |
| Ø hodnota                                | <b>20,22</b> | <b>74,25</b> | <b>5,53</b>  | <b>39,46</b> | <b>46,55</b> | <b>13,99</b> |              |             |

Příloha 3. Procentuální zastoupení prvků ve slitinách

| Celkové rozpočítané náklady na přetavovací pec Mistral 260 v Kč |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |         |
|---|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| rok   | 0         | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13      | 14      | 15      |
| investice   | 216 596   | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -       | -       | -       |
| elektrřna   | -         | 1 241  | 1 335  | 1 436  | 1 546  | 1 663  | 1 789  | 1 925  | 2 072  | 2 229  | 2 399  | 2 581  | 2 777  | 2 988   | 3 215   | 3 460   |
| mzdy  | -         | 6 013  | 6 356  | 6 718  | 7 101  | 7 506  | 7 934  | 8 386  | 8 864  | 9 369  | 9 903  | 10 468 | 11 065 | 11 695  | 12 362  | 13 067  |
| materiál  | -         | 58 643 | 60 461 | 62 336 | 64 268 | 66 260 | 68 314 | 70 432 | 72 615 | 74 867 | 77 187 | 79 580 | 82 047 | 84 591  | 87 213  | 89 917  |
| údržba  | 983       | 264    | 279    | 1 373  | 312    | 330    | 329    | 369    | 390    | 1 706  | 435    | 460    | 1 904  | 514     | 543     | 574     |
| revize  | -         | 722    | 744    | -      | 791    | 815    | 841    | 867    | 894    | 921    | 950    | 979    | 1 010  | 1 041   | 1 073   | 1 107   |
| oprava  | -         | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | 6 785  | -      | -      | -       | -       | -       |
| CF  | 217 579   | 66 883 | 69 176 | 72 630 | 74 018 | 76 575 | 80 408 | 81 979 | 84 834 | 89 092 | 97 660 | 94 068 | 98 803 | 100 829 | 104 407 | 108 123 |
| NPV   | 1 232 258 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |         |
| RCF   | 103 222   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |         |
| RCF na experiment   | 12 903    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |         |

Přiloha 4. Celkové rozpočítané náklady na pec Mistral 260

| Celkové rozpočítané náklady na zařízení pro pájení v parách ATF VP 400 v Kč |           |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| rok   | 0         | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      | 11      | 12      | 13      | 14      | 15      | 16      | 17      | 18      | 19      | 20      |
| investice   | 1 176 983 | -      | -      | -      | -      | -      | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| elektrřna   | -         | 1 788  | 1 924  | 2 070  | 2 228  | 2 397  | 2 579   | 2 775   | 2 986   | 3 213   | 3 457   | 3 720   | 4 003   | 4 307   | 4 634   | 4 987   | 5 366   | 5 774   | 6 212   | 6 684   | 7 192   |
| mzdy  | -         | 8 720  | 9 217  | 9 743  | 10 298 | 10 885 | 11 505  | 12 161  | 12 854  | 13 587  | 14 362  | 15 180  | 16 046  | 16 960  | 17 927  | 18 949  | 20 029  | 21 170  | 22 377  | 23 653  | 25 001  |
| materiál  | -         | 73 924 | 76 215 | 78 578 | 81 014 | 83 525 | 86 115  | 88 784  | 91 537  | 94 374  | 97 300  | 100 316 | 103 426 | 106 632 | 109 938 | 113 346 | 116 859 | 120 482 | 124 217 | 128 068 | 132 038 |
| údržba  | 983       | 524    | 1 599  | 586    | 1 730  | 654    | 1 872   | 731     | 2 028   | 817     | 2 197   | 913     | 2 383   | 1 020   | 2 585   | 1 139   | 2 806   | 1 273   | 3 048   | 1 422   | 1 503   |
| revize  | -         | 722    | 744    | 767    | 791    | 815    | 841     | 867     | 894     | 921     | 950     | 979     | 1 010   | 1 041   | 1 073   | 1 107   | 1 141   | 1 176   | 1 213   | 1 250   | 1 289   |
| oprava  | -         | -      | -      | -      | -      | -      | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| CF  | 1 177 966 | 85 678 | 89 700 | 91 744 | 96 061 | 98 277 | 102 913 | 105 319 | 110 299 | 112 913 | 118 266 | 121 109 | 126 867 | 129 960 | 136 157 | 139 527 | 146 201 | 149 875 | 157 067 | 161 077 | 167 023 |
| NPV   | 2 936 138 |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| RCF   | 197 355   |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| RCF na experiment   | 19 735    |        |        |        |        |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |

Přiloha 5. Celkové rozpočítané náklady na pec ATF VP 400