



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie**

Studium vlivu latentního tepla u pájení přetavením

Study of the effect of latent heat in reflow soldering

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Karel Dušek, PhD.

Vít Zahradník

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Vít Zahradník**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Studium vlivu latentního tepla u pájení přetavením**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií pájení přetavením se zaměřením na teplotní profil.
- 2) Změřte teplotní profily pro různé kombinace a uspořádání pájecích plošek, pájecí pasty a součástek s ohledem na uvolnění latentního tepla při tuhnutí pájeného spoje.
- 3) Výsledky měření vyhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

- [1] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [2] Pietriková A., Ďurišín J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálů pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2
- [3] Rudajevová A., Dušek K.: Study of Undercooling and Recalescence During Solidification of Sn 62.5 Pb 36.5 Ag 1 and Sn 96.5 Ag 3 Cu 0.5 Solders in Real Electronic Joints. Journal of Electronic Materials. 2014, vol. 43, art. no. 7, p. 2479-2486. ISSN 0361-5235

Vedoucí: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



Ing. Karel Dušek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 3. 2015

Prohlášení:

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

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu práce Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. a kolegovi Ing. Martinu Plačkovi za pomoc s výběrem tématu, za cenné připomínky, odborné rady k práci a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům, kteří mi poskytovali morální podporu po dobu mého studia, zejména při vypracovávání bakalářské práce.

Abstrakt

Práce se zabývá studiem vlivu latentního tepla u pájení přetavením různých pájecích slitin na různých vzorcích. Výsledkem měření jsou teplotní profily pájecích slitin, které se poté vyhodnotí. U teplotního profilu se hodnotí zejména odlišnost od referenčního teplotního profilu, popř. od jiného zásahu do vlivu latentního tepla. V práci jsou popsány pájecí slitiny, způsoby šíření tepla a technologie pájení přetavením.

Abstract

This thesis studies the influence of latent heat in reflow soldering alloys on various different samples. The result of measurement are temperature profiles of solder alloys, which are then evaluated. For the temperature profile is evaluated, difference from the reference temperature profile, resp. from another intervention to influence the latent heat. The thesis describes soldering alloys, spreading heat and reflow soldering technology.

Klíčová slova

Latentní teplo, pájení přetavením, pájecí slitiny, teplotní profil

Key words

Latent heat, reflow soldering, soldering alloys, temperature profile

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Pájky.....	8
2.1 Pájky a pájecí slitiny.....	8
2.1.1 Druhy pájecích slitin.....	9
2.1.1.1 Olovnaté pájky.....	9
2.1.1.2 Bezolovnaté pájky.....	9
2.1.2 Formy pájecích slitin	10
2.1.2.1 Používaná tavidla.....	11
2.2 Fázové diagramy pájecích slitin.....	12
2.2.1 Fázový diagram cín-olovo	12
2.2.2 Fázový diagram cín-stříbro	13
2.2.3 Fázový diagram cín-měď	14
2.2.4 Fázový diagram cín-měď-stříbro.....	15
2.3 Intermetalické fáze	15
3. Šíření tepla.....	16
3.1 Přenos tepla vedením (kondukcí).....	17
3.2 Přenos tepla prouděním (konvekcí).....	18
3.3 Přenos tepla sáláním (radiací).....	19
4. Technologie pájení.....	20
4.1 Měkké pájení.....	21
4.1.1 Hromadné pájení přetavením	22
4.1.1.1 Pájení infračerveným zářením.....	22
4.1.1.2 Pájení v parní lázni	23
4.1.1.3 Pájení horkým plynem	23
4.1.2 Teplotní profil (→ latentní teplo).....	24
4.2 Defekty pájení.....	25
5. Experimenty.....	27
5.1 Použité pájky.....	27
5.2 Použité přístroje	27
5.3 Druhy vzorků	29
5.4 Výsledky měření a jejich zhodnocení	31
6. Závěr	35

Zdroje	36
Knižní zdroje:	36
Elektronické zdroje:	36
Přílohy:	38
Příloha č. 1: SnPbE, vzorek 3, první měření	38
Příloha č. 2: SnPbE, vzorek 3, druhé měření	38
Příloha č. 3: SnAg4, vzorek 3, první měření	39
Příloha č. 4: SnCu1, vzorek 3, první měření	39
Příloha č. 5: SnCu1, vzorek 3, druhé měření	40
Příloha č. 6: SnCu1, vzorek 3, třetí měření	40
Příloha č. 7: SnCu1, vzorek 3, čtvrté měření	41
Příloha č. 8: SnCu07, vzorek 1, první měření	41
Příloha č. 9: SnCu07, vzorek 1, druhé měření	42
Příloha č. 10: SnCu07, vzorek 1, třetí měření	42
Příloha č. 11: SnCu07, vzorek 2, první měření	43
Příloha č. 12: SnCu07, vzorek 2, druhé měření	43
Příloha č. 13: SnCu07, vzorek 2, třetí měření	44
Příloha č. 14: SnAg35, vzorek 1, první měření	44
Příloha č. 15: SnAg35, vzorek 2, první měření	45
Příloha č. 16: SnAg35, vzorek 2, druhé měření	45
Příloha č. 17: SnAg35, vzorek 2, třetí měření	46
Příloha č. 18: SAC305, vzorek 1, první měření	46
Příloha č. 19: SAC305, vzorek 1, druhé měření	47
Příloha č. 20: SAC305, vzorek 1, třetí měření	47
Příloha č. 21: SAC305, vzorek 2, první měření	48
Příloha č. 22: SAC305, vzorek 2, druhé měření	48
Příloha č. 23: SAC305, vzorek 2, třetí měření	49
Příloha č. 24: Referenční TP, vzorek 1, první měření	49

1. Úvod

Ve své práci „Studium vlivu latentního tepla u pájení přetavením“ se budu zabývat zejména druhy pájek a jejich teplotními profily.

Se zvyšujícím se tlakem na rozměry technologií se zvyšují požadavky na výrobu, použití, životnost i cenu a objevují se skutečnosti a problematiky, které jsou pro svět technologií nové, nebo byly zatím neaplikovatelné a nestudované. Stále vyšší pozornost je věnována problematice latentního tepla tuhnutí pájky u pájení přetavením, čímž se v této práci budu zabývat.

Nejprve budou probrány pájecí slitiny olovnaté i bezolovnaté, jejich vlastnosti, použití a výhody a nevýhody. Formy použití pájecích slitin a tavidla.

Poté intermetalické fáze vznikající na rozhraní pájky a pájené plošky. Dále fázové diagramy slitin a jejich případné změny při vzniku intermetalické fáze.

Nedílnou součástí studia tepla a jeho vlivu je šíření tepla. Přiblížíme si technologii pájení přetavením a úskalí spojené s tímto postupem. Poté budou provedeny experimenty na modelových DPS, kde budou zkoumány zejména teplotní profily, ze kterých se bude vycházet a vyhodnocovat výsledky. Jedna podkapitola bude věnována diskusi, jak latentní teplo ovlivňuje okolí.

2. Pájky

2.1 Pájky a pájecí slitiny

Pájet se začalo přibližně po roce 3000 před naším letopočtem, kdy se egyptští zlatníci naučili spojovat zlaté předměty, zde se jednalo o tvrdé pájení. Kolem roku 2000 před naším letopočtem bylo objeveno měkké pájení, tímto způsobem se spojovaly olovené vodovodní trubky. Pájkou už v této době byl cín. Od té doby prošly pájky razantním vývojem, dnes existují různé druhy pájecích slitin pro různé typy použití. Pájka je materiál

s nízkou teplotou tání, kterou v elektrotechnice používáme pro spojování kovů s cílem nejen mechanické odolnosti, ale také pro zachování elektrické vodivosti.

2.1.1 Druhy pájecích slitin

Základní rozdělení pájek je pro tvrdé a měkké pájení. Tvrdým pájením se spojují zejména více namáhané spoje, jako jsou např. rámy kol, trubky apod. Tím to se v této práci zabývat nebudeme. Další zmíněné je měkké pájení, pro které se používají dva typy rozdělené podle toho, zda obsahují olovo – olovnaté a bezolovnaté.

Základem všech pájek je cín (Sn), ke kterému se přidává v určitém množství v případě olovnaté pájky olovo (Pb), popř. další kov jako je stříbro (Ag), měď (Cu) atd., v případě bezolovnaté pájky se k cínu přidává malé množství mědi, stříbra, zinku (Zn), bismutu (Bi), antimonu (Sb), germania (Ge) a jejich kombinace.

2.1.1.1 Olovnaté pájky

Mezi nejčastěji používané olovnaté pájky patří eutektická slitina SnPb37 s teplotou tavení 183°C. Změnou poměru cínu a olova můžeme ovlivnit určité vlastnosti, např. teplotu tavení. Přidáním dalšího kovu můžeme ovlivnit jiné vlastnosti, nebo přizpůsobit pájku pájenému materiálu, nebo způsobu pájení. Např. pájecí slitina Sn60Pb40 je vhodná pro hromadné pájení vyžadující širší interval tavení. Slitiny obsahující měď, Sn62Pb37Cu1 a Sn60Pb38Cu2, jsou vhodné pro ruční páječky, jelikož snižují rozpouštění měděných hrotů páječků a součástek. Měď také zvyšuje pevnost spoje. Existují také speciální pájecí slitiny - s obsahem stříbra pro vyšší teplotou tavení, nebo naopak s obsahem bismutu pro nižší teplotou tavení.

2.1.1.2 Bezolovnaté pájky

Od července roku 2002 je platná Evropská směrnice 2002/95/ES, která dovoluje používat pouze pájky s obsahem olova maximálně 0,5%. Proto se dostávají do popředí

zájmu pájecí slitiny bez obsahu olova, což vlastnosti pájek výrazně ovlivňuje. Většina bezolovnatých pájek je dražší, než slitiny Sn/Pb, majoritní podíl cínu je doplňován většinou drahými kovy. Cena pájky je závislá na ceně jednotlivých složek a odvíjí se od dostupnosti těchto složek na trhu. Dostupnost jednotlivých prvků je závislá na celosvětových zásobách. Jedním z hlavních rozdílů je, že bezolovnaté pájky mají obecně vyšší teplotu tání, to má za následek vyšší energetickou náročnost [2].

K cínovému základu bezolovnatých pájek se nejčastěji přidává stříbro (Ag) a nebo měď (Cu). Jednou z rozšířenějších patentovatelných pájek je SAC305, která obsahuje 3% stříbra a 0,5% mědi. Teplota tavení se pohybuje okolo 217-220°C a je vhodná pro pájení vlnou, přetavením i ruční pájení. Používá se v automobilovém a telekomunikačním průmyslu. Mezi další často používané slitiny patří SnCu07, jedná se o eutektickou pájku vhodnou pro ruční pájení s teplotou tavení 227°C, tato slitina je náchylná na kontaminace a používá se ve spotřebitelském a telekomunikačním průmyslu. Mezi levnější pájky patří slitina Sn91Zn9, zinek je ale velmi náchylný k oxidaci a k nečistotám obecně, proto je pájení v ochranné atmosféře nutné. Zinek u této pájky zhoršuje i smáčivost a hůře se skladuje. Příjemnou vlastností je jeho teplota tavení (199°C) pohybující se blízko olovnatým pájkám. Zmiňme ještě slitinu SnAg4, která má teplotu tavení 221°C[2].

2.1.2 Formy pájecích slitin

V technologickém procesu pájení je důležitý faktor, pro kvalitní a rychlou práci, použitá forma pájecí slitiny. V sériových výrobcích se používají dávkovače pájecích past, nebo tisk pájecí pasty přes šablony. Pájecí pasty se dodávají v tubách, nebo v miskách s uzavíratelným hrdlem. Při ručním pájení se používají pájky ve formě dutého „drátku“ (trubičky), nebo pájecích tyčí. Kovy a jejich slitiny mají oblíbenou činnost zvanou oxidaci, která negativně ovlivňuje pájený spoj. Proto se do pájecích slitin přidávají tavidla, která omezují oxidaci a pomáhají pájce vytvořit dokonalejší spoj.

2.1.2.1 Používaná tavidla

Tavidla mají funkci omezení oxidace při pájení a chrání pájený spoj před pozdější oxidací, pájce pomáhají s roztavením a smáčením. Zbytky tavidel ale mohou zapříčinit nežádoucí stavy na DPS, tavidla mohou být elektricky vodivá nebo korozní, proto je většinou nutné je omýt.

Stejně jako je pájek nesčetné množství, tavidel je také tolik s různými vlastnostmi a různým použitím. Rozdělují se podle typu, kalafunová, organická a anorganická. Poté na jakém základu jsou tvořena. Kalafunové tavidlo je tvořeno přírodní pryskyřicí, je to jedno z nejrozšířenějších tavidel. Samotná pryskyřice je málo aktivní, přidávají se tak do ní aktivátory (organické kyseliny). Dále se tyto tavidla dělí podle úrovně aktivity na R, RMA, RA, RSA. Tavidlo SA je tvořeno syntetickou pryskyřicí.

Tavidlo typu R je tavidlo s nejnižší aktivitou, skládá se z čisté vodní bílé pryskyřice a není moc agresivní, používá se pro čištění měděných, cínových nebo cíno-olovněných povrchů. Zbytky tavidel jsou netečné a nemusí být po pájení odstraněny.

Tavidlo typu RMA je tavidlo se střední aktivací. Pro zvýšení aktivace se do tavidla přidává malé množství vhodné organické směsi jako jsou např. aminohydrochloridy, polybazické karbonové kyseliny a allylové organické halogenidy. Normy většinou udávají, které chemické a elektrické testy musí tavidlo typu RMA splňovat. Toto tavidlo je používá se snadno pájitelnými materiály, jako je měď, zlato a cíno-olověné pájky. Obecně se tavidlo typu RMA bere jako netečné, odstranění je tedy volitelné. Proces koroze je brzděn, dokud je aktivátor vázán s pryskyřicí.

Tavidlo typu RA, s aktivátory, obsahuje agresivnější příměsi, které u snadno pájitelných materiálů urychlují smáčivost a tím redukuje množství defektů pájecího procesu. Normy opět neuvádějí jaké příměsi mohou být použity, jen jaké testy tavidlo musí splňovat. U tohoto typu je kompletní odstranění zbytků kvůli zvýšené agresivitě více než doporučené. Neodstraněné tavidlo na desce plošných spojů může podpořit dlouhodobou korozi, zvláště ve vlhkém prostředí.

V tavidle typu RSA je obsažen velmi silný aktivátor. Neodstranění tavidla by mělo za následek korozi kovových částí desky plošných spojů.

Syntetická aktivovaná tavidla SA jsou založena na mono- a di- isooktylu fosfátových směsí kombinovaných s různými příměsmi ke zlepšení aktivity a usnadnění

odstraňování zbytků. Používají se pro pájení vlnou a pájecích pastách, protože jejich složení může být přesně kontrolováno.

Bezoplachová tavidla (No-clean) se moc neliší od tavidel, které se z desky odstraňují, musí však splňovat určité podmínky, aby bylo možné tavidlo označit jako bezoplachové. Tavidlo nesmí zanechávat korozivní zbytky, naopak musí zajišťovat dokonalou pájitelnost. Nesmí na desce zanechávat lepivé zbytky a nesmí zhoršovat stav pájecího zařízení. V běžném tavidle je obsah pevné složky cca 40%, v bezoplachovém tavidle je obsah těchto látek 1 - 5%. [19][20][21]

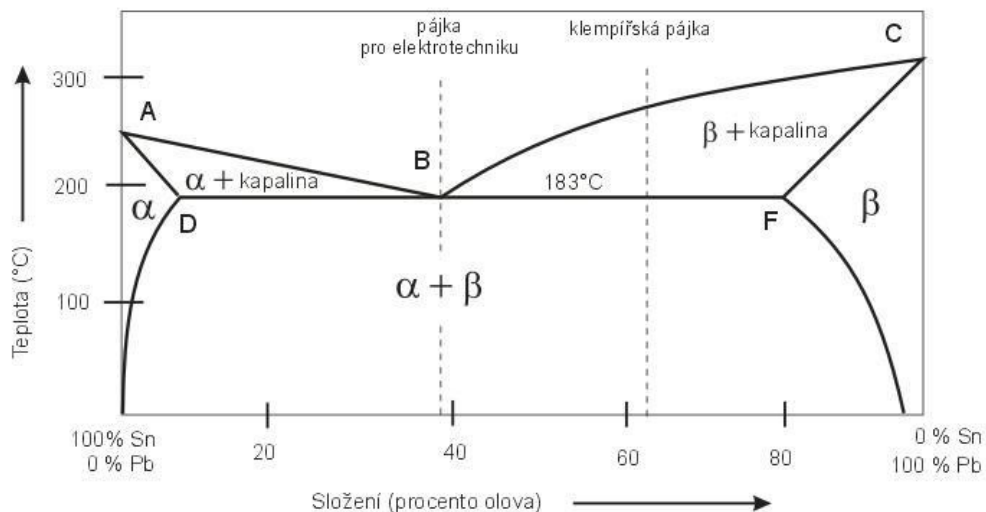
V další části se seznámíme s fázovými diagramy pájecích slitin, v kterých můžeme „číst“ vlastnosti různých poměrů kovů. Fázové diagramy budeme také potřebovat pro kapitulu intermetalických fází.

2.2 Fázové diagramy pájecích slitin

Fázový diagram popisuje chování pájky, v němž je vyznačena čára liquidu určující teplotu přechodu z pevné do kapalné formy. [2] Diagram vyjadřuje fázi poměru slitiny v závislosti na teplotě.

2.2.1 Fázový diagram cín-olovo

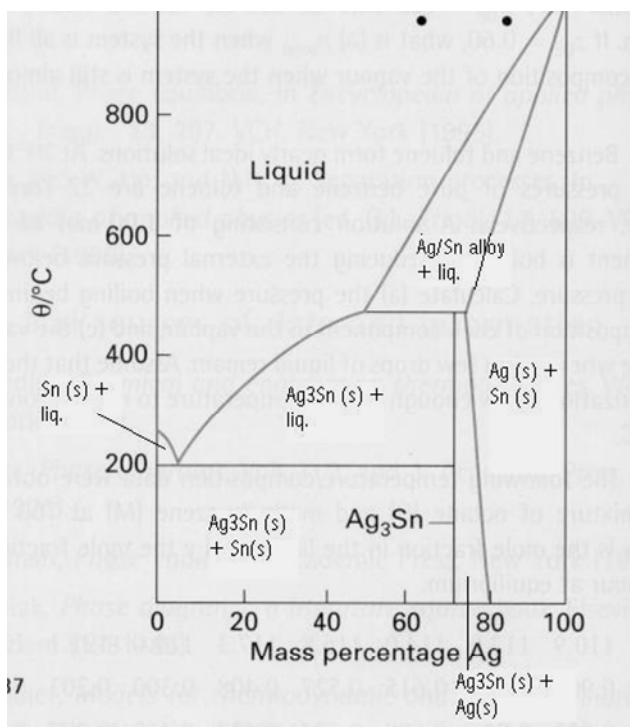
V obrázku č. 1 je fázový diagram cínu a olova, kde rozhraní mezi kapalným a pevným skupenstvím je křivka připomínající písmeno „v“. Oblast nad křivkou „v“ se nazývá křivka liquidu. Bod „B“ v obrázku vyznačuje poměr mezi cínem a olovem 63 ku 37, právě v tomto poměru je slitina eutektická. Pokud je slitina eutektická, tuhnou oba kovy společně a krystalizují do společné struktury. „alfa“ a „beta“ v obrázku vyjadřují tuhost daného kovu, alfa – cín, beta – olovo. Bod „A“ a bod „C“ jsou teploty tavení daných kovů.



Obr. č. 1 – Fázový diagram cín – olovo [9]

2.2.2 Fázový diagram cín-stříbro

Další fázový diagram máme možnost si prohlédnout na obrázku č. 2. Jedná se o diagram cínu a stříbra, kde můžeme vidět, jak stříbro úměrně zvyšuje teplotu tavení slitiny.

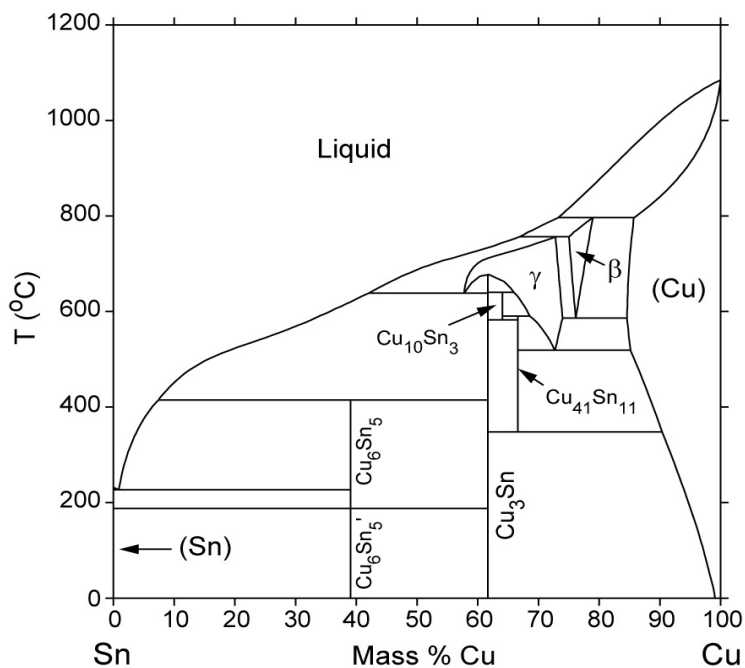


Obr. 2 – Fázový diagram cín – stříbro [10]

Křivka „v“ je tentokrát hned ze začátku s minimem okolo 4% stříbra. Všimněme si oblastí, kde se vyskytuje sloučenina stříbra a cínu v tuhém stavu spolu s kapalnou formou samotného cínu. Pod těmito oblastmi cín tuhne osamoceně.

2.2.3 Fázový diagram cín-měď

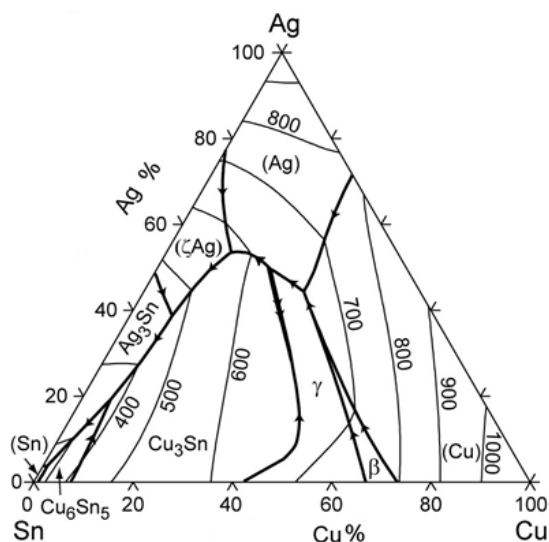
Další je obrázek 3, který znázorňuje fázový diagram cínu a mědi. Měď dodává slitině pevnost, v pájkách se používá pouze v několika desetínách procent (0,3% – 0,7%), výjimečně 3% . Měď se do pájecích slitin přidává kvůli ochraně měděných hrotů ručních páječek, mj. vytváří v kombinaci s cínem intermetalické fáze, o kterých bude řeč v další kapitole. Všimněme si „v“ křivky, že eutektický bod je právě ve zmíněných několika desetínách procent.



Obr. 3 – Fázový diagram cín – měď [11]

2.2.4 Fázový diagram cín-měď-stříbro

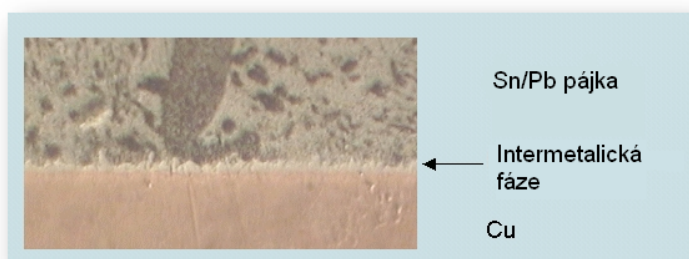
Poslední v kapitole fázových diagramů je obrázek č. 4, trojstranný fázový diagram slitiny cínu, mědi a stříbra. V tomto diagramu se s pájkami pohybujeme v levém spodním rohu, kde se mj. objevují sloučeniny Ag_3Sn a Cu_6Sn_5 , jedná se o intermetalické fáze.



Obr.č. 4 – Fázový diagram cín – měď – stříbro [12]

2.3 Intermetalické fáze

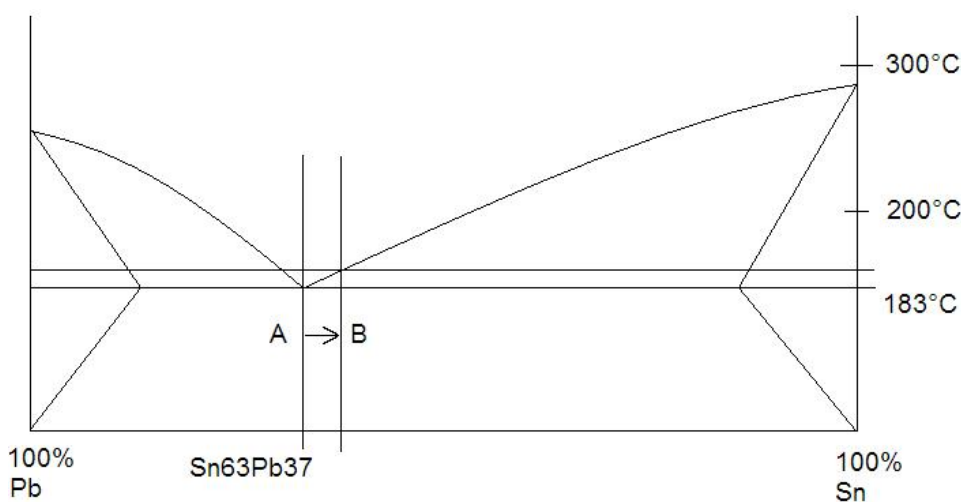
Během pájení vlivem tavicích teplot začíná reagovat cín s měděnou ploškou. Je to běžný proces, který nám negativně ovlivňuje stárnutí a životnost pájeného spoje, na druhou stranu je důkazem jeho úspěšného vytvoření. Intermetalické vrstvy, vytvořené mezi pájecí



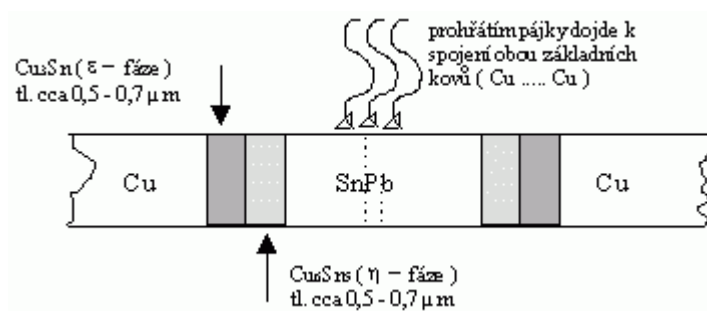
Obr. Č. 5 – příklad intermetalické fáze 1 [13]

slitinou a měděnou destičkou – jak je patrné z obrázků č. 5 a č. 6. Sloučeniny Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn mají nežádoucí vlastnost, že se s časem zvyšuje jejich tloušťka, což bývá výrazně urychlováno vyššími teplotami.

Úspěšně vytvořený pájený spoj touto skutečností časem ztrácí své mechanické a elektrické vlastnosti. Vytvořená intermetalická sloučenina může způsobit i posun ve fázovém diagramu právě tím, že měď reaguje s cínem a tímto z pájecí slitiny odebere určité množství. Např. máme Sn63Pb37 a Cu (měděný podklad), vytvoří se intermetalická sloučeniny Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn a v pájecí slitině se změní obsah cínu. Změna obsahu cínu má za následek posun ve fázovém diagramu od bodu A k bodu B (Obr. č. 14) a změnu některých vlastností, v tomto případě zejména zvýšení teploty tání.



Obr. č. 12 – Posun ve fázovém diagramu



Obr. č. 6 - příklad intermetalické fáze 2 [14]

3. Šíření tepla

Šíření tepla je jedním ze způsobů přenosu energie. Přenos vždy probíhá ve směru od tělesa s větší energií (teplejší) k tělesu s menší energií (chladnější). Přenos tepla probíhá třemi způsoby, vedením, prouděním a sáláním.

3.1 Přenos tepla vedením (kondukcí)

Přenos tepla vedením je jeden ze způsobů šíření tepla v tuhých tělesech. Teplo je vedeno uvnitř tělesa, nebo přes kontaktní plochu dvou tuhých těles. Teplo vedením se ve speciálních případech šíří i v kapalinách a plynech, kde však přenos tepla zajišťuje zejména proudění. Teplo se šíří v důsledku kmitání částic, které předávají svou energii částicím s nižší energií.

Vedení tepla můžeme sledovat podle stavu tepla [16]:

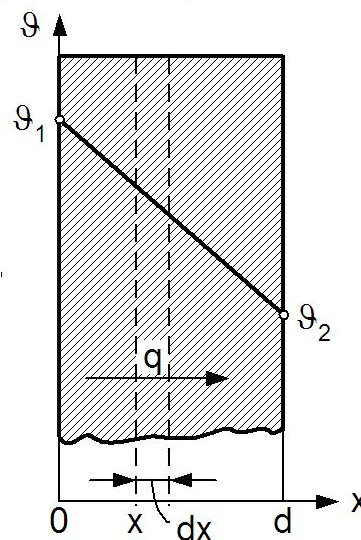
- **Ustálené (stacionární)** – teplota částí tuhého tělesa se v čase nemění
- **Neustálené (nestacionární)** – teplota částí tuhého tělesa se mění v závislosti na čase

Vedení tepla vychází z Fourierova zákona /1/, kde λ je součinitel teplotního toku – charakterizuje tepelnou propustnost látky – tzv. měrná tepelná vodivost, q je hustota tepelného toku a $\text{grad}\vartheta$ je gradient teploty neboli teplotní růst (se záporným znaménkem se jedná o spád):

$$\lambda = -\frac{q}{\text{grad}\vartheta} \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}] \quad /1/$$

Tuhá tělesa mají tepelnou vodivost, která udává množství tepla Q proteklého jednotkovým průřezem S za jednotku času t při teplotním spádu 1K na jednotku délky. Je to po dosazení do /1/ dáno vztahem:

$$\lambda = -\frac{q}{\text{grad}\vartheta} = \frac{Q\cdot d}{S\cdot t\cdot\Delta\vartheta} \quad /2/$$



Obr. č. 12 – Jednoduchá rovinná stěna

Nejjednodušším příkladem vedení tepla je jednoduchá rovinná stěna (Obr. č. 12). Jedná se o stěnu nekonečně velkou o tloušťce d , teplo je tu vedeno jen v jednom směru, na ose x .

Důležitou vlastností materiálu je teplotní odpor, který je definován jako míra odporu proti pronikání tepla tělesem [17]. Teplotní odpor je přímo úměrný tloušťce materiálu d a nepřímo úměrný součiniteli teplotního toku a ploše protékaného tepla /3/.

$$R_T = \frac{d}{\lambda S} \quad /3/$$

Celkový teplotní odpor R_{CT} tělesa složeného z více materiálů je součet teplotních odporů jednotlivých materiálů R_{T1} , R_{T2} a popřípadě i přechodu mezi materiály R_{T12} /4/.

$$R_{CT} = R_{T1} + R_{T12} + R_2 + \dots + R_n \quad /4/$$

Teplená vodivost /5/ G_T :

$$G_T = \frac{1}{R_T} = \frac{\lambda S}{d} \quad /5/$$

3.2 Přenos tepla prouděním (konvekci)

Přenos tepla prouděním je další ze způsobů šíření tepla. Je založen na principu přenosu tepla pohybujícími se částicemi v kapalině, nebo v plynu. Proudění v kapalině nebo plynu zajišťuje i ohřívání tuhého tělesa v přímém kontaktu s danou kapalinou nebo plynem. Typickým příkladem proudění je zemská atmosféra, kde teplejší vrstvy kapaliny nebo plynu stoupají vzhůru. Je to způsobeno menší hustotou teplejších vrstev a gravitací. Je-li v prostoru kapalina nebo plyn se stejnou teplotou, má stejnou hustotu a je v klidu. Tento jev se využívá například při ohřívání kapaliny zdola, ochlazování shora nebo pro cirkulaci vody v ústředním topení. Proudění způsobené rozdílem hustoty částí kapaliny nebo plynu se nazývá volné.

Nucené proudění je způsobeno vlivem vnější síly jako je vítr, ventilátor nebo čerpadlo. Přenos tepla nuceným pohybem částic závisí na fyzikálních vlastnostech a druhu kapaliny, nebo plynu, na rychlosti proudění, teplotě, jejich teplené vodivosti atd.

V přírodě volné proudění s prouděním nuceným od sebe nelze zcela oddělit, lze pouze vymezit kdy má které proudění jaký vliv. Tzn. že při velmi malé rychlosti nuceného proudění má větší vliv na přenos tepla volné proudění, naopak při velkých rychlostech je

vliv volného proudění zanedbatelný. V laboratorních podmínkách lze osamostatnit volné proudění od nuceného. [17]

Množství tepla popisuje Newtonův zákon /6/:

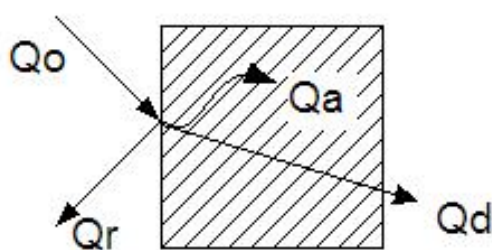
$$Q = \alpha S \Delta \vartheta \quad /6/$$

Z tohoto zákona /6/ lze vyjádřit tepelný odpor R:

$$R = \frac{\Delta \vartheta}{Q} = \frac{1}{\alpha S} \quad /7/$$

3.3 Přenos tepla sáláním (radiací)

Sálání je přirozená vlastnost každého tělesa a každé těleso vyzařuje energii. Přenos je zapříčiněn elektromagnetickým zářením jednoho tělesa k druhému prostředím, kterým záření může procházet. Na rozdíl od vedení nebo proudění, sáláním se teplo může přenášet i ve vakuu. Při dopadu vyzářené energie Q_0 na druhé těleso je část pohlcena Q_a , část odražena Q_r a část prochází tělesem Q_d . Odražená energie pokračuje k dalšímu tělesu, kde je opět část pohlcena, odražena a prostoupena (Obr. č. 13). Vyzářená energie závisí na několika faktorech. Množství energie ve formě teploty tělesa je popsáno Planckovým vyzařovacím zákonem. Dalším faktorem je barva a stav povrchu, stříbřité lesklé povrchy vyzařují nejmenší energii, naopak černé drsné povrchy vyzařují největší. Barva a stav



povrchu má stejný vliv i na pohlcení, resp. odražení energie, tzv. absolutně černé těleso pohlcuje veškerou energii dopadnutou na povrch. Třetím faktorem je obsah plochy. Vyzářená energie je přímo úměrná obsahu povrchu vyzařovaného tělesa.

Obr. č. 13 – Šíření tepla sáláním

Množství energie Q , které vyzařuje těleso za určitou časovou jednotku, se nazývá sálavostí tělesa a značí se E . Platí tedy:

$$E = \frac{Q}{S} \quad /8/$$

Množství energie Q_0 dopadající na těleso se rozděluje na energii pohlcenou Q_a , odraženou Q_r a teplo, které tělesem projde Q_d . Platí tedy:

$$Q_a + Q_r + Q_d = Q_0 \quad /9/$$

Po vydělení rovnice /9/ Q_0 dostaneme rovnici:

$$\frac{Q_a}{Q_0} + \frac{Q_r}{Q_0} + \frac{Q_d}{Q_0} = A + R + D = 1 \quad /10/$$

V rovnici /10/ je člen A poměrná tepelná pohltivost, člen R je poměrná tepelná odrazivost a člen D je poměrná tepelná propustnost. Jedná se o bezrozměrné členy pohybující se v intervalu $\langle 0;1 \rangle$.

Je-li $A=1$, pak $D=0$, $R=0$, celá dopadající energie Q_0 je pohlcena tělesem, které nazýváme absolutně černé.

Je-li $D=1$, pak $A=0$, $R=0$, celá dopadající energie Q_0 je propuštěna přes těleso, které nazýváme absolutně průzračné.

Je-li $R=1$, pak $A=0$, $D=0$, celá dopadající energie Q_0 je odražena tělesem, které nazýváme absolutně bílé.

V přírodě se tyto tělesa nevyskytují, tělesa bez těchto krajních hodnot nazýváme tělesa šedá. Ze situací je zřejmé, že tělesa s vyšším R , tzn. lepší odrazivostí hůře energii pohlcují a naopak.[18]

Se sáláním souvisí i některé zákony termodynamiky, zejména:

- Planckův vyzařovací zákon
- Wienův posunovací zákon
- Stefan - Boltzmannův zákon

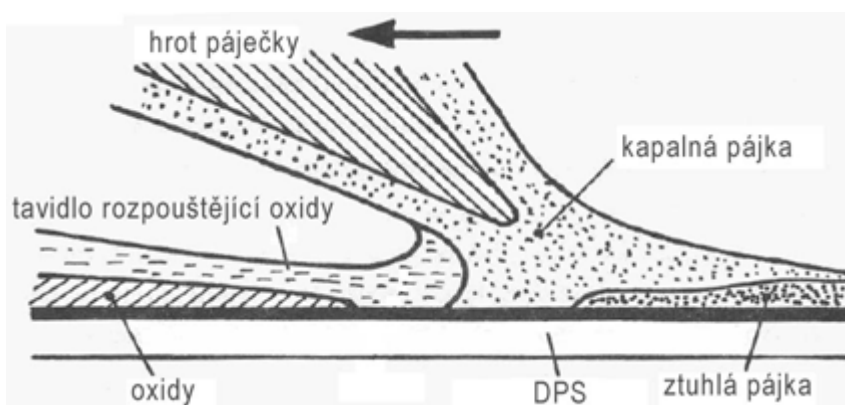
4. Technologie pájení

Pájení pájecími slitinami se používá pro pevné metalurgické spojování kovových materiálů. Pájení primárně rozdělujeme na měkké a tvrdé, přičemž pájení do 450°C

považujeme za měkké a nad 600°C tvrdé. Pájecí slitiny mají nižší teplotu tavení, než spojované kovy.

4.1 Měkké pájení

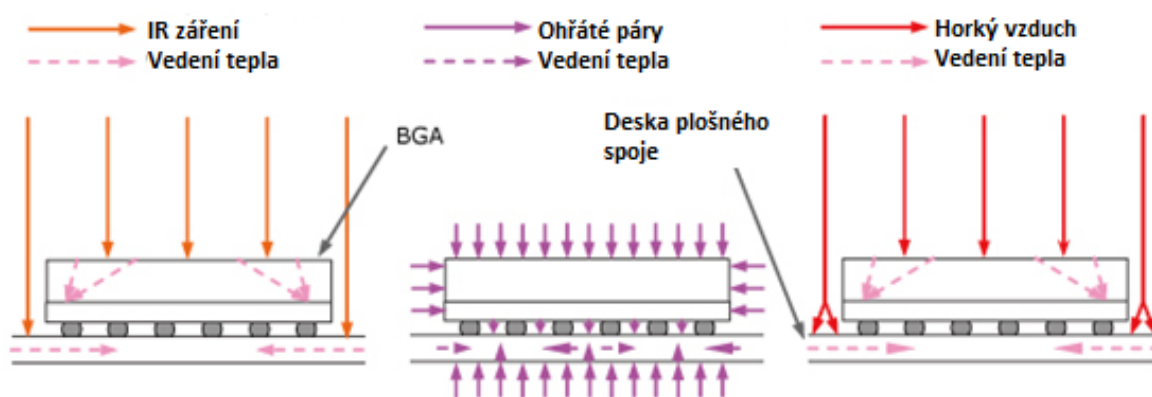
Měkké pájení ke své činnosti využívá pájky pro to určené. V elektrotechnice je to způsob, jak docílit kvalitního propojení součástek nejen na desce plošných spojů. Po dlouhou dobu a jako první se používalo ruční pájení. Pro dnešní dobu je to způsob zastaralý, v sériové výrobě, kde většinu obstarávají stroje, odpadá činitel lidské chybovosti. Používá se v diagnostických a opravárenských centrech, nebo v malovýrobách pájením běžných součástek THT. Pro ruční pájení se používá páječka s hrotem předehřátým na teplotu okolo 300°C, jedná-li se o pájenou pájku olovnatou, a do spoje se pájka přidává po zahřátí spoje. Pájky určené pro tento způsob jsou běžně vyráběny jako trubičky naplněné tavidlem, které pomáhá k lepšímu smáčení pájky se součástkou a deskou. Technologie však zaznamenala určitý pokrok a měkké pájení rozdělujeme na různé způsoby, jako je pájení vlnou, pájení přetavením, pájení ponorem, pájení vlečením a pájení ultrazvukem. Každá z těchto technik má své výhody a nevýhody a zde se budeme zabývat pájením přetavením.



Obr. 7 – Tvorba ručně pájeného spoje [7]

4.1.1 Hromadné pájení přetavením

Tento způsob pájení je rozšířen ve výrobcích, kde se stroje starají téměř o vše, tzn. mají na starost přípravu desky, nanášení pájky ve správném množství a poté přetavení a očištění. Hromadné pájení přetavením se provádí v pecích využívajících infračerveného záření, horkého vzduchu, nebo parní lázně (Obr. č. 8). Systém je nastaven většinou na předehřev a samotné přetavení. Nanášení pájky na desku plošných spojů se může provádět tiskem přes šablonu nebo dávkovačem.



Obr. č. 8 – Přenos tepla

Tisk přes šablonu se používá v sériových výrobcích. Šablony se vyrábí jako fólie z mědi, mosazi, nebo nerezové ocele s otvory na pastu v přesně daných místech. Šablona leží na desce a po přejetí stěrky se protlačí pasta otvory.

Nanášení pájecí pasty dávkovačem je přesné s přesně daným množstvím pájky díky dávkování přes píst. Používá se v prototypové/malosériové výrobě, kde se nevyplatí výroba šablon.

4.1.1.1 Pájení infračerveným zářením

Pájení IR zářením je založeno na absorpci různých vlnových délek pájenými předměty, které procházejí pecí. Jako zdroje záření se používají např. topné spirály zalisované do keramického materiálu, wolframové žárovky s halogenovým cyklem. Ohřev

zde nezávisí jen na zdrojích záření, ale i na absorpci okolního plynného prostředí. Výhodou této metody jsou nižší náklady na provoz a kratší časy pájení. Negativní vliv na ohřev pájených spojů má velikost součástek a vytváření jejich stínů. Také velikost pouzder silně ovlivňuje teplotu na vývodech součástek. Může se stát, že spoj bude přehřátý nebo nepřetavený. [6]

4.1.1.2 Pájení v parní lázni

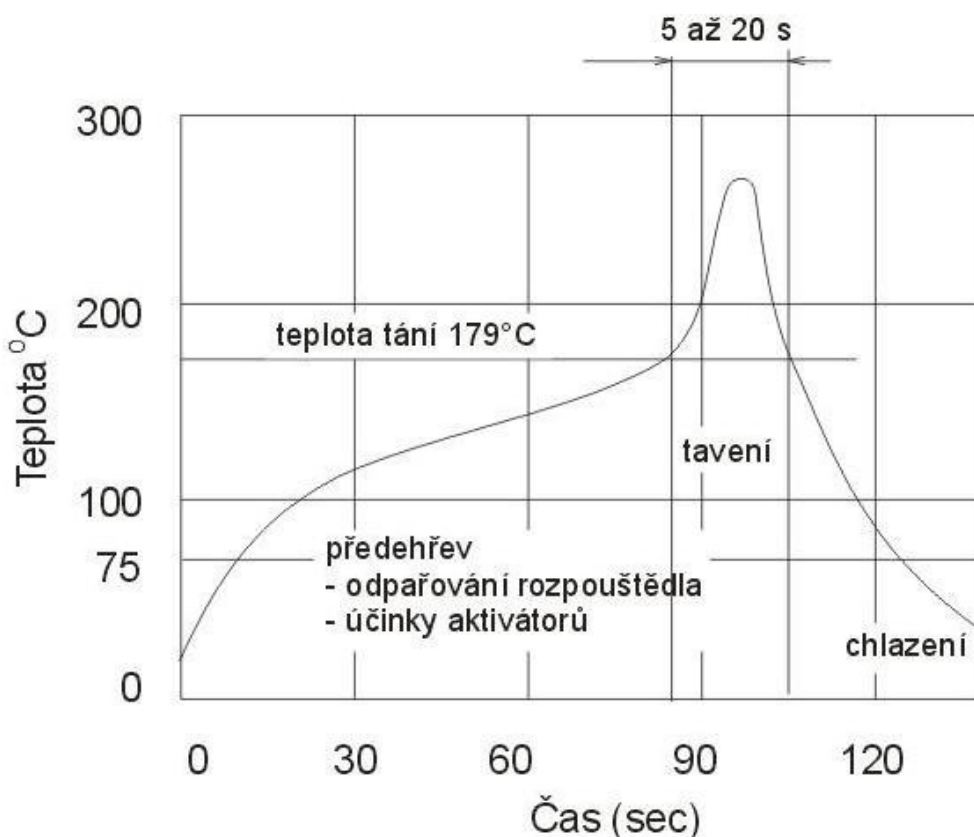
Tato metoda má hlavní výhodu v tom, že páry neobsahují kyslík a spoje neoxidují, pájí se tedy v téměř ochranné atmosféře. Kapalina se přivede do bodu varu a začne se odpařovat, do páry musí být deska přivedena postupně, aby nedošlo k teplotnímu šoku. Princip je založen na kondenzaci páry na studených místech desky, která je schopna, díky přenosu tepla, se ohřát až na teplotu nasycené páry. Rozložení teploty je zcela rovnoměrné, odpadá shadow effect (stínění). Kapalina musí být neagresivní vůči všem součástkám, aby nedošlo k jejich poškození. Nevýhodami jsou například skutečnosti, že tyto kapaliny mají k dispozici pouze některé pájecí teploty, mimo to jsou tyto kapaliny velmi drahé a odpařují se. Existují ale systémy, kde se spotřeba pájecí kapaliny pohybuje v desítkách mg na vsazku. [6]

4.1.1.3 Pájení horkým plynem

Pro tuto metodu se využívá většinou vzduch a dusík. Pro omezení oxidace spojů se ve fázi přetavení používá dusík, ve fázích předehřevu a chlazení vzduch. Proudění vzduchu zajišťují trysky umístěné v podélných a příčných pásmech. Jednotlivá pásma mají nastavenou svou teplotu, ke které se teplota desky s časem přibližuje. Ohřev desky je rovnoměrnější a není tolik závislý na parametrech součástek, ale trvá déle, než u IR zářiče. Tok proudu plynu působí i na součástky. [6]

4.1.2 Teplotní profil (→ latentní teplo)

Teplotní profil (viz. Obr. č. 9) je závislost teploty na čase, u pájení přetavením by měl určovat teplotní průchod pecí, aby došlo k ideálnímu přetavení pájky, bývá předepsán výrobcem. Pro zachycení teplotního profilu se používají profilometry, vícekanálové záznamové zařízení pro sběr dat z teplotních čidel, které jsou připojené k požadovaným místům.



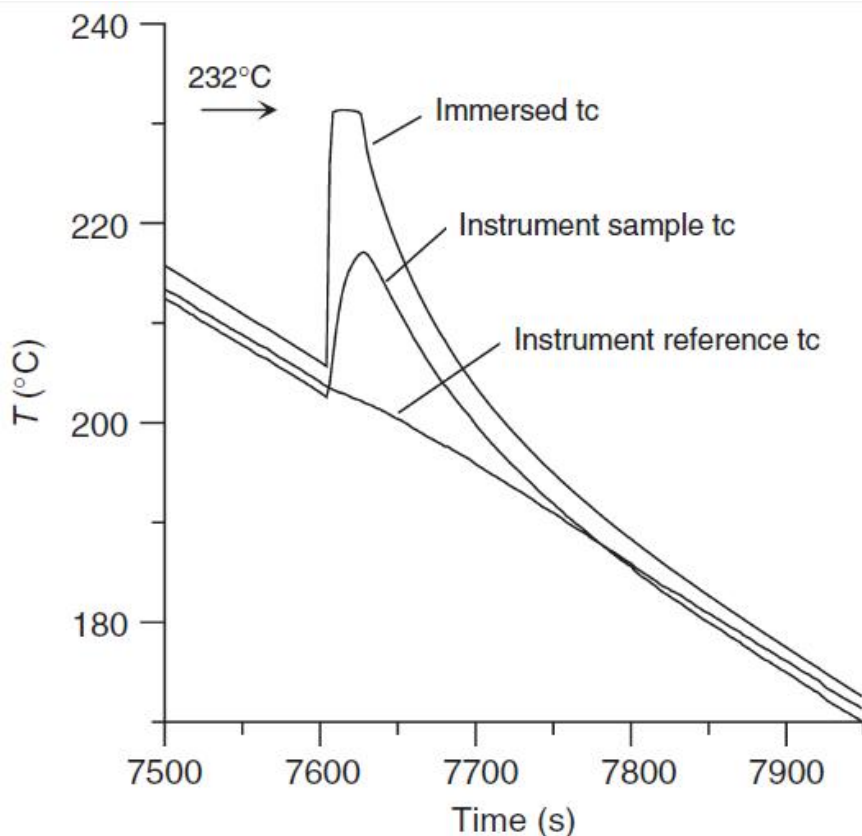
Obr. č. 9 – Teplotní profil [8]

Během tavení se v pájce akumuluje energie, která se drží uvnitř po celou dobu liquidu (kapalné formy). Při zchladnutí pájky na teplotu, kdy už chce přejít z kapalné do pevné formy (Liquid to Solid), se uchovaná energie z pájky uvolňuje, tomu se říká latentní teplo. Není to ale tak jednoduché, v publikacích je uváděno, že po dobu uvolňování latentní energie je teplota pájky konstantní. To platí, jedná-li se o makroskopické pojetí problému. Publikace *Methods for Phase Diagram Determination* [15] uvádí, že při chladnutí (rychlostí 5 K/min) malého množství (konkrétně 163,2 mg) čistého cínu může latentní teplo vyvolat uvnitř kovu nárůst teploty o 20-30°C. Při takovém rozdílu se kov

opět přetaví a znovu chladne (Obr. č. 11). Na obrázku jsou tři pozice teplotních senzorů, uvnitř cínu, na stěně plošky v těsném kontaktu s cínem a bez kontaktu tzv. referenční.

Samozřejmě zde platí zákon o zachování energie /11/, energie dodaná do pájky ve formě latentního tepla, se musí z pájky také uvolnit, definuje to kalorimetrická rovnice:

$$Q_1 = Q_2 \quad /11/$$



Obr. č. 11 – Chladnutí čistého Sn 5K/min [15]

4.2 Defekty pájení

Během pájení mohou nastat stavy, při nichž není pájený spoj klasifikován jako kvalitní. Pro vytvoření kvalitního pájeného spoje musí být splněny tyto podmínky:

- dobrá smáčivost
- správná pracovní teplota
- dostatečné množství pájky (ne moc ani málo)

Spoj by po dodržení těchto podmínek měl být lesklý, hladký a musí být zřetelný ostrý úhel smáčení cca 20°.

Při nedodržení podmínek pro vytvoření kvalitního pájeného spoje, může vzniknout nedokonalost, nebo chyba, která pájený spoj, nebo funkčnost desky negativně ovlivňuje. Tzv. defekty vedou k nevyhovujícím mechanickým a elektrickým vlastnostem spoje, jako jsou zkraty, nebo nevodivost, větší tepelné zatěžování spoje a součástky. Při namáhání spoje existuje možnost mechanického poškození. Technologie pájení se věnuje mj. studiím, které by tyto chyby v pájení minimalizovaly. S příchodem bezolovnatých pájek se této problematice věnují experimenty po celém světě, jelikož jsou tyto pájky k defektům náchylnější a objevují se častěji.

Mezi nejčastější defekty patří studený spoj, tzv. „studeňák“. Jeho příčinou může být nedostatečné prohřátí spoje, použité nevhodné tavidlo, nebo nečistoty (oxidace..) spojovaných kovů, což vytvoří matný, hrubý spoj. Spoj může být elektricky nevodivý a při mechanickém namáhání se může rozpadnout.

Špatně smáčený spoj vzniká u součástek, kde se při přetavení pájka smočí pouze na součástce, nebo na desce. Příčinou jsou nečistoty na nesmáčené pozici. Vzniká tak elektricky nevodivé místo.

Další defekt, můstek, se vytváří mezi vývody součástek, které jsou dostatečně blízko u sebe a alespoň jeden spoj obsahuje více pájky. U vývodů vzdálených méně než 0,4mm se můstek může vytvořit i s optimálním množstvím pájecí pasty. Při přetavení se pájecí pasty spojí a vytvoří tak nežádané spojení - zkrat. Velmi často se můstky vytváří u součástek s větším počtem vývodů, jako jsou procesory, hradlová pole apod.

Pokud se pájecí pasta během osazování desky dostane pod součástku, vytvoří se po přetavení kuličky pájky, které po špatném očištění mohou migrovat po desce a případně způsobit zkrat.

Poslední zmíněný defekt je Tombstone effect – efekt náhrobního kamene (též Stonehenge, Tombstoning..), kde dochází ke zvednutí součástky a tím přerušení obvodu. Časté u velmi malých dvouvývodových SMD součástek. Příčinou může být nesprávně osazená součástka, chybně navržená deska plošných spojů, kde je rozdílný poměr pájecích plošek. Vliv na tombstone effect může mít i latentní teplo pájky na jednom vývodu, které přes součástku může ovlivňovat pájku na druhém vývodu.

5. Experimenty

Praktická část práce se zabývá měřením teplotních profilů přetavením různých olovnatých i bezolvnatých pájek. Měření probíhalo na modelových deskách plošných spojů s různým množstvím pájky a umístěním. Také bylo měřeno tuhnutí většího množství pájky v kalíšku s více čidly. Metody měření a konkrétní informace budou uvedeny u každého experimentu zvlášť.

5.1 Použité pájky

V experimentu jsem použil tyto pájky:

Slitina	Teplota tání	Obsah olova	Jiný kov	Další kov
	[°C]	[%]	[%]	[%]
SnPb37E	183	37	-	-
SnAg35	221	-	Ag 3,5	-
SnAg4	221	-	Ag 4	-
SnCu1	227	-	Cu 1	-
SnCu07	227	-	Cu 0,7	-
SAC305	218	-	Ag 3	Cu 0,5

Zbytek slitiny je cín (Sn) a popř. nečistoty (v řádu max desetín procent)

5.2 Použité přístroje

Během experimentu byly používány přístroje pro přetavování a měření teplotních profilů.

Přístroj **MISTRAL 260** je průběžná přetavovací pec (Obr. č. 10) s třemi zónami ohřevu. První dvě zóny slouží k předehřevu a třetí k přetavení. Pec má také aktivní chlazení pomocí ventilátorů. IR články zajišťují ohřev vzduchu, který je ventilátory rozváděn v

zónách ohřevu. Pomocí dotykového displeje byly nastaveny teploty vzduchu v jednotlivých zónách a byla nastavena i rychlost automatického dopravníku.

Nastavené údaje:

Předehřev 1 – 155°C

Předehřev 2 – 205°C

Přetavení – 255°C

Posuv – 15 cm/min (minimální rychlost dopravníku)



Obr. č. 10 – Průběžná pec MISTRAL 260

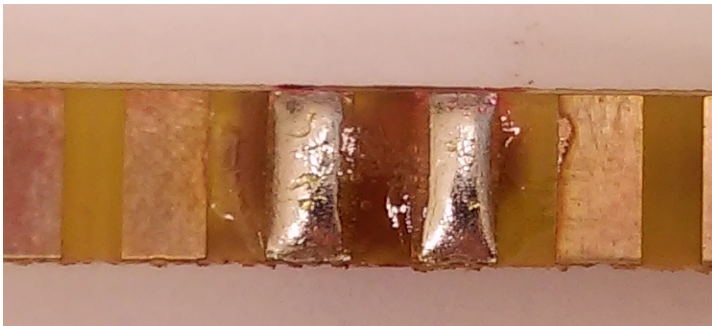
Přístroj **KIC Explorer** (Obr. č. 11) je sedmikanálový profilometr, který zaznamenává teplotu s využitím dvou čidel (Vzorek 1, Vzorek 2), resp. tří čidel (Vzorek 3). Data jsou z profilometru pomocí USB kabelu, který propojuje přístroj s počítačem, převáděna do Dataloggeru online, tzn. profilometr je připojen k PC během zaznamenávání. Datalogger KIC 2000 zpracovává data z profilometru a vytváří grafickou podobu teplotního profilu v PC.



Obr. č. 11 – Profilometr KIC Explorer

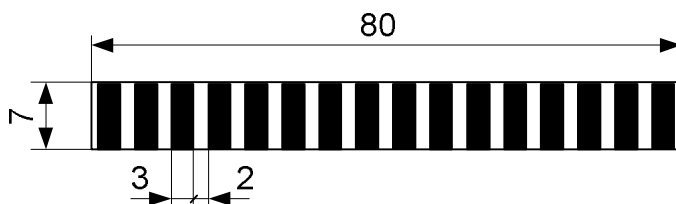
5.3 Druhy vzorků

Fotografie vzorku č. 1 – termočlánky jsou umístěné a připevněné pod dvěma pájecími ploškami s nanesenou pájkou, aby mohl vzorek projít pecí a byl stabilní, umístili jsme vzorek na křídové podložky připevněné drátkem a kaptonovou páskou. Desku jsem pouštěl pecí ve směru vyznačeném na obrázku. Na Obr. č. 24a jsou znázorněny rozměry vzorku č. 1 (i vzorku č. 2) a na Obr. č. 24b je destička znázorněna schematicky.

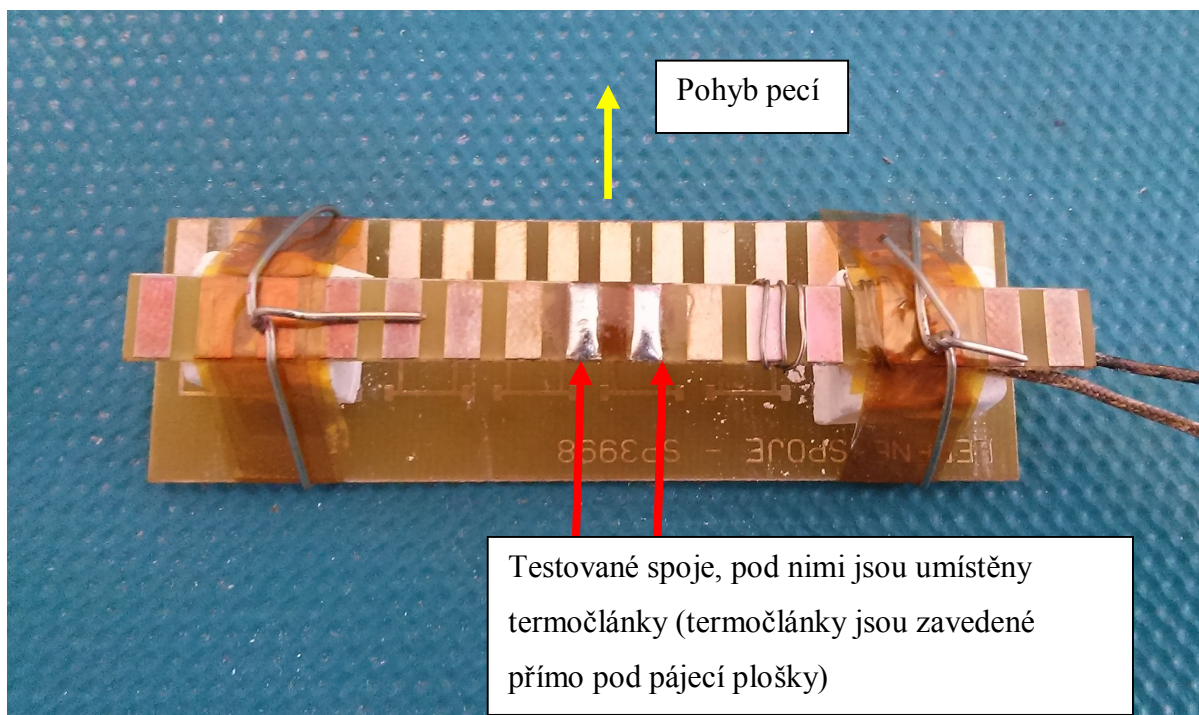


Obr. č. 24a - detail dvou pájecích plošek s přetavenou pájecí slitinou

Měděné plošky mají rozměry 3x7 mm a jsou od sebe vzdáleny 2 mm. Pro měření byly vybrány 2 měděné plošky uprostřed testovací destičky, která má tloušťku 0,6 mm

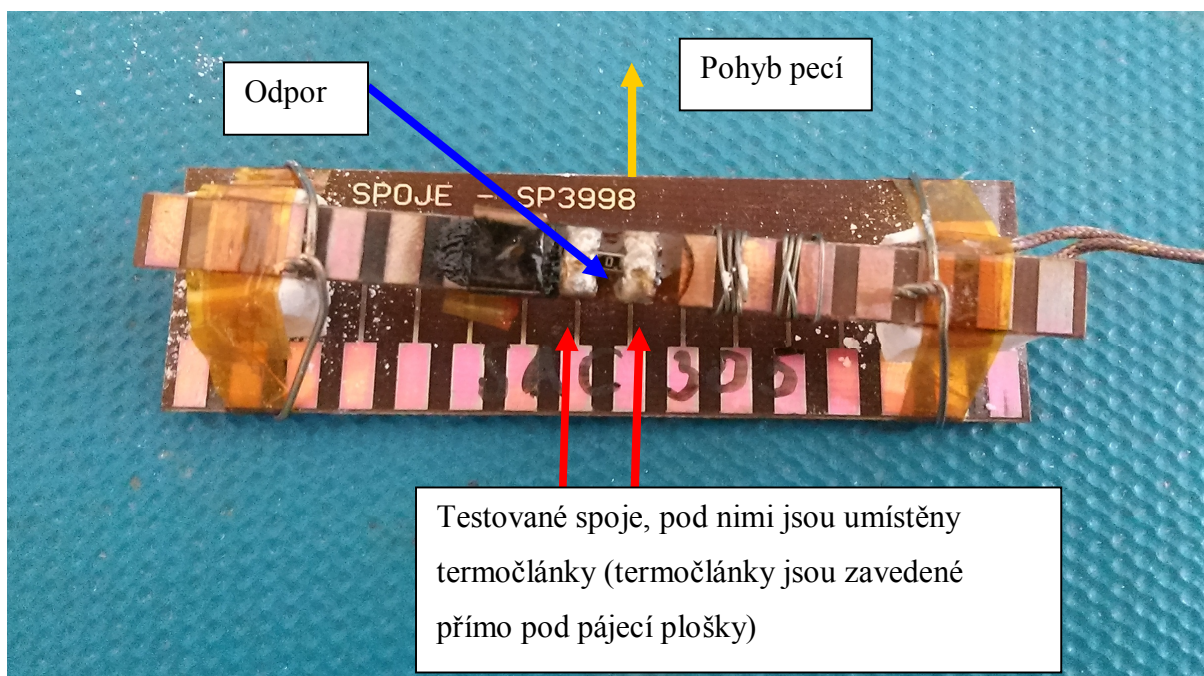


Obr. č. 24b - schematicky zobrazuje testovací destičku.



Vzorek č. 1 – pájka na ploškách vedle sebe

Fotografie vzorku č. 2 – jedná se o stejný vzorek jako na fotografii vzorku č. 1 s tím rozdílem, že testované plošky jsou spojené připájeným nulovým odporem, opět pohyb pecí vyznačen na obrázku



Vzorek č. 2 – pájka na ploškách vedle sebe spojené připájeným odporem

Fotografie vzorku č. 3 – kalíšek naplněný pájkou měřený třemi termočlánky, které jsou umístěné od kraje ke středu označeny čísly 1-3, termočlánky jsou připevněny ke stojně a vkládány do pájky dostatečně zahřáté pomocí Meniskografu



Vzorek č. 3 – pájka měřená třemi termočlánky v kalíšku

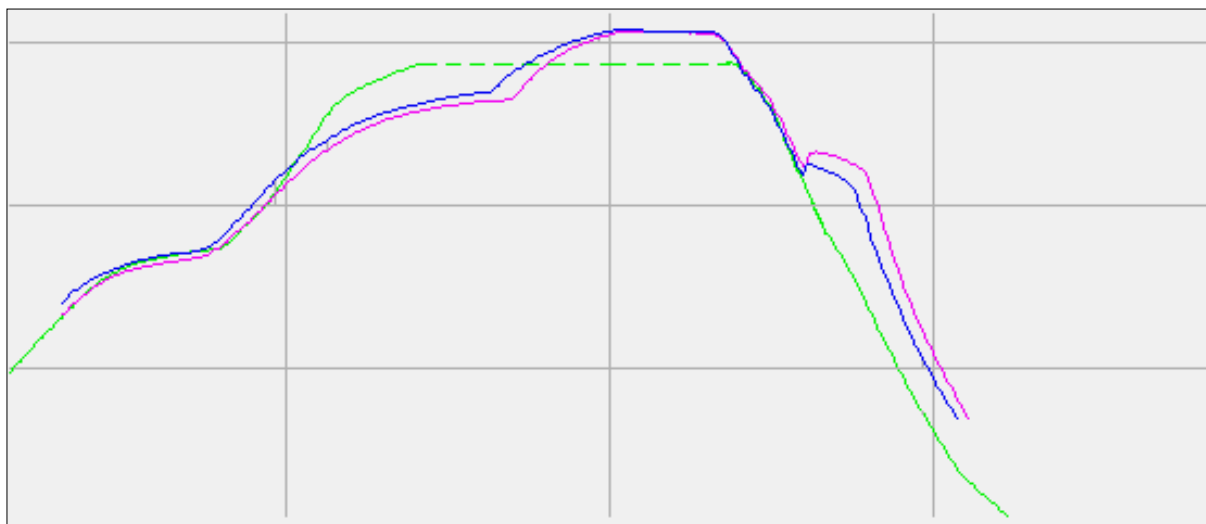
5.4 Výsledky měření a jejich zhodnocení

Tabulka reprezentuje přehled měřených slitin a vzorků.

Slitina	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Přílohy
	[A/N]	[A/N]	[A/N]	
SnPbE	N	N	A	1. - 2.
SnAg4	N	N	A	3.
SnCu1	N	N	A	4. - 7.
SnAg3,5	A	A	N	14. - 17.
SnCu07	A	A	N	8. - 13.
SAC305	A	A	A	18. - 23.

Vzorky se budou vyhodnocovat na základě tvaru sledované oblasti. Sledovaná oblast je v tomto případě přechod pájky L -> S, z kapalné do pevné formy. Porovnávat se bude použitá pájka na jednotlivých vzorcích k referenčnímu teplotnímu profilu.

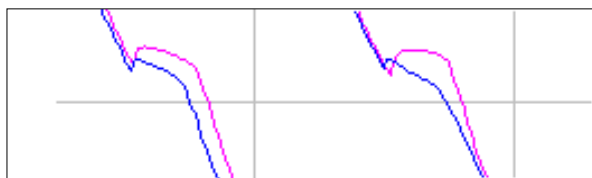
Obr. č. 15 je složen z příloh č. 24 (červená linie změněna na zelenou) a č. 10. Jedná se o pájku **SnCu07**. Množství pájky na obou ploškách je stejné, 140 mg. Je zřejmé, že k přechodu S -> L je potřeba dodat teplo, které se v pájce ukrývá až do přechodu L -> S.



Obr. č. 15 – detail porovnání referenčního TP (zelený) s TP pájky plošky 1 (červený) a 2 (modrý)

Ve sledované oblasti je možné si prohlédnout chvilkový strmý nárůst teploty červené a modré linky. Nahromaděná energie ve formě latentního tepla se uvolnila a ještě je u pájky na ploškách patrný nárůst teploty. Poté pájka definitivně chladne.

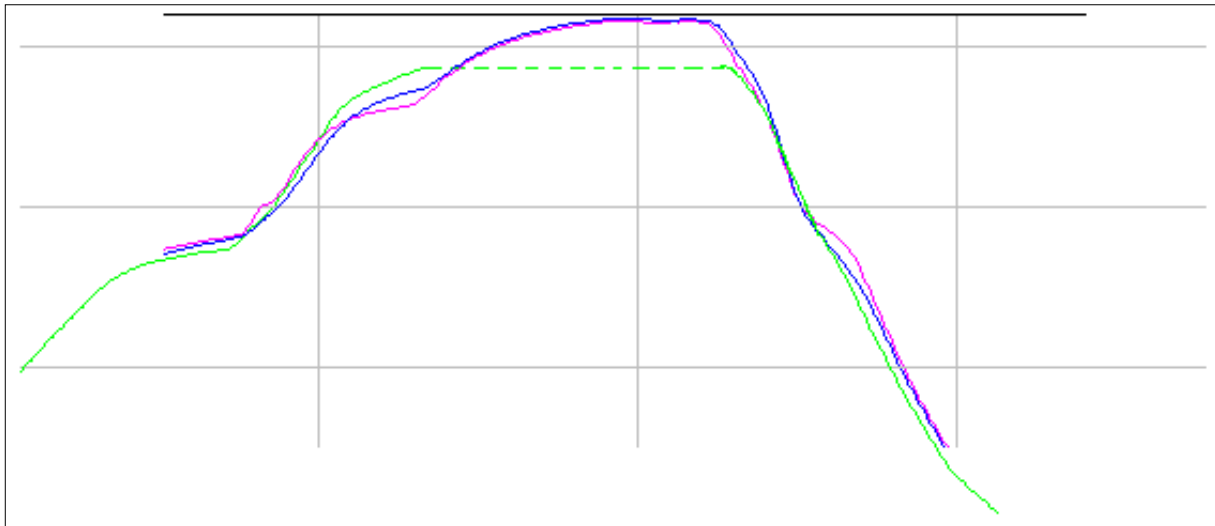
Na Obr. č. 16 je rozdíl mezi měření vzorku č. 1 a vzorku č. 2, tedy nepropojené plošky z přílohy č. 10 (vlevo) a plošky propojené SMD odporem z přílohy č. 11 (vpravo).



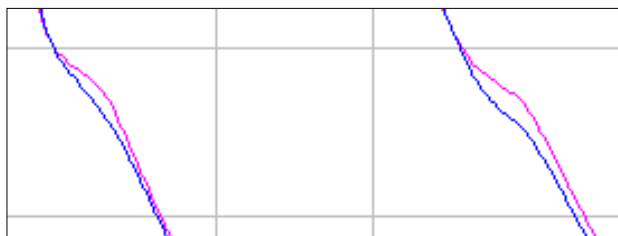
Obr. č. 16 – detail přechodu L -> S, bez a s odporem

Razantní rozdíl zde není, je ale zřejmé, že jedna ploška uvolnila více tepla, které by mohlo pocházet z druhé plošky díky spojení odporem. U většiny TP se projevila stejná situace.

U pájky **SnAg35** není situace tak výrazná. Množství pájky bylo opět 140 mg. Latentní teplo je minimální, ve sledované oblasti není zcela žádný nárůst teploty, pouze pomalejší chladnutí, viz. Obr. č. 17, zde se to projevilo nejméně.



Obr. č. 17 – detail porovnání referenčního TP (zelený) s TP pájky plošky 1 (červený) a 2 (modrý)

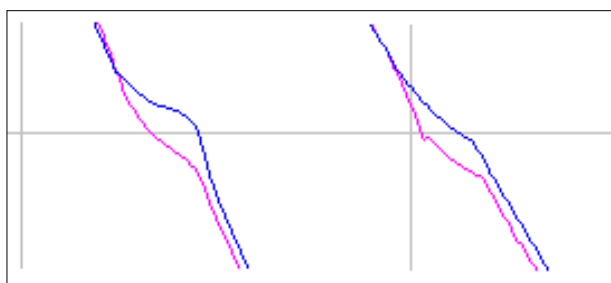


Obr. č. 18 - detail přechodu L -> S, bez a s odporem

U porovnání mezi vzorkem 1 a 2 je také rozdíl nepatrný. Pájka na plošce 2 u vzorku 2 (vpravo) uvolňuje teplo trochu později, než u vzorku 1, je to ovlivněno cestou přes odpor.

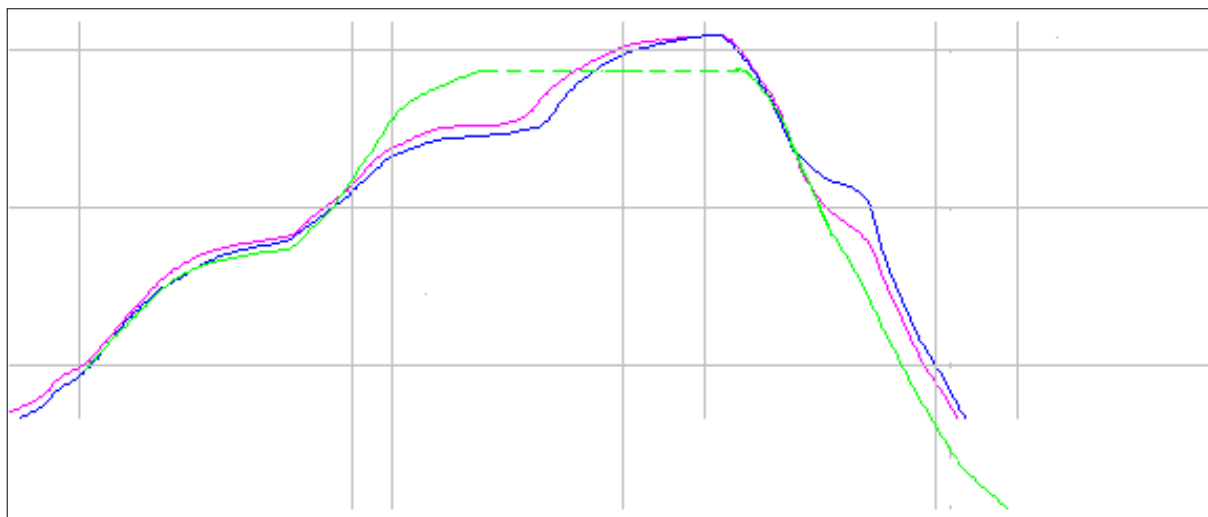
Pájecí slitina **SAC305** je vlastně trochu upravená kombinace dvou předešlých pájek a jejich teplotním profilům by se tento měl podobat. Na Obr. č. 19 je opět znázorněn referenční teplotní profil (zelený) s teplotními profily dvou plošek s pájkou (1. červená a 2. modrá). Latentní teplo se uvolňuje postupně s rostoucí intenzitou, z plošky 2 více, než z plošky 1.

Rozdíl mezi vzorkem 1 a 2 není výrazný (Obr. č. 20). Teplotní profil ve sledované



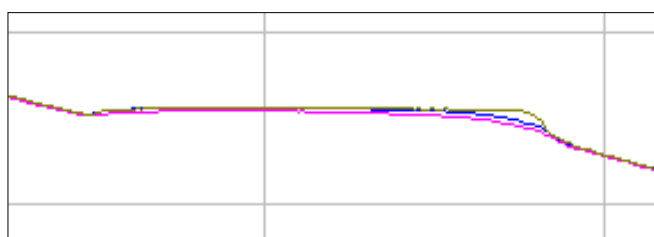
Obr. č. 20 - detail přechodu L -> S, bez a s odporem

oblasti u vzorku 2 (vpravo) vypadá ostřejší, způsobeno to může být odporem mezi ploškami, tak že díky této cestě pájka reaguje rychleji a přelévá uvolněné teplo přes zmíněný odpor.



Obr. č. 19 - detail porovnání referenčního TP (zelený) s TP pájky plošky 1 (červený) a 2 (modrý)

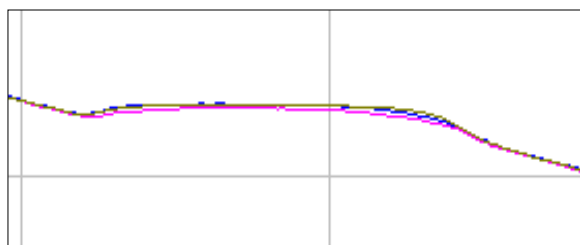
V příloze č. 7 je chladnutí většího množství pájky **SnCu1**, záznam probíhal na vzorku 3. Obr. č. 21 znázorňuje, jak chladne větší množství pájecí slitiny. Z obrázku je



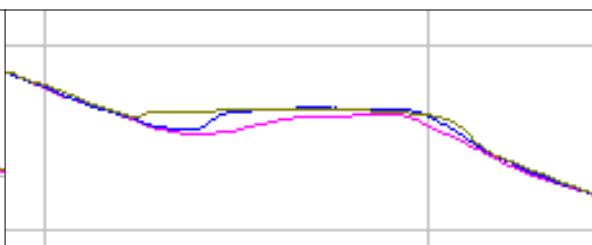
jasné, že latentní teplo z pájky drží konstantní teplotu. Čidlo na kraji pájky (červená) zaznamenalo nejmenší teplotu, čidlo uprostřed největší (zelená).

Obr. č. 21 – detail přechodu L -> S

Dalším zaznamenaným prvkem ve stejném množství je pájecí slitina **SnAg4**, která uvolňuje latentní teplo více kompaktně, teplota se snaží udržet všude stejná, v jeden moment dokonce čidlo 2 uprostřed (modrá), přesáhne teplotu středu, což se u předchozí slitiny nestalo.



Obr. č. 22 -- detail přechodu L -> S



Obr. č. 23 - detail přechodu L -> S

Nejlepší zaznamenané výsledky vzorku 3 byly u slitiny **SnPbE**. Z Obr. č. 23 je zřejmé, že se kraj pájky (1) ochladí spolu s čidlem 2 nejvíce (červená a modrá), pod tlakem latentního tepla od středu se postupně otepluje pájka v oblasti čidla 2 a nakonec i kraj. Poté drží teplotu jako celek. Po vyčerpání nahromaděné energie pájka opět chladne.

6. Závěr

Tato práce se věnuje problematice latentního tepla u pájení přetavením. Nejprve bylo cílem práce seznámení se s problematikou technologie pájení přetavením se zaměřením na teplotní profil. Technologie pájení obsahuje pájky, jejich fázové diagramy a intermetalické fáze tvořené přetavením. V práci jsou zmíněny všechny měřené vzorky a použité druhy pájecích slitin.

Z výsledků je zřejmé, že energie ve formě tepla dodaná pájce, pro přechod z pevného do kapalného stavu, se uvolňuje při přechodu z kapalného do pevného stavu. Zatímco při roztavení pájky se teplo akumuluje postupně u všech použitých pájecích slitin, při chladnutí se latentní teplo uvolňuje v závislosti na použití konkrétní slitiny.

Například u pájky SnCu07 se latentní teplo uvolní tak, že se teplota na čidle zvýší o cca 10°C a po uvolnění pokračuje v chladnutí. Naopak u slitiny SnAg35 se uvolnění latentního tepla děje postupně a na teplotním profilu víceméně není nic zajímavého.

Výsledkem těchto dvou slitin je SAC305, která obsahuje 3% stříbra a 0,5% mědi. Je to tedy, při minimální změně poměrů, kombinace SnCu07 a SnAg35. Teplotní profil podle toho taky vypadá, když se latentní teplo nejprve uvolňuje pomaleji a poté trochu zrychluje, tvoří takové „sedlo“.

Podle výsledků měření na vzorku 2 lze říci, že součástka (konkrétně SMD rezistor 0Ω) má velmi malý vliv na uvolnění nebo působení latentního tepla mezi ploškami. Největší vliv se objevil u pájecí slitiny SnCu07, kde součástka mohla pomoci v šíření latentního tepla od plošky č. 2 k plošce č. 1.

U vzorku 3 bylo demonstrativně dokázáno, že latentní teplo, podle teorie, dokáže při přeměně skupenství z kapalného do pevného držet teplotu pájky konstantní. V makroskopickém měřítku se pájka chová velmi podobně jak při akumulaci latentního tepla, tak při jeho uvolnění. Při bližším prozkoumání se latentní teplo z pájky uvolňuje složitěji.

Zdroje

Knižní zdroje:

- [15] Zhan, J.-C.: Methods for Phase Diagram Determination, Elsevier Ltd. 2007
- [19] MACH, Petr, SKOČIL, Vlastimil, URBÁNEK, Jan: *Montáž v elektrotechnice*, ČVUT, Praha 2001.
- [20] ABEL, Martin, CIMBUREK, Vladimír: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, s.r.o., Pardubice 2005

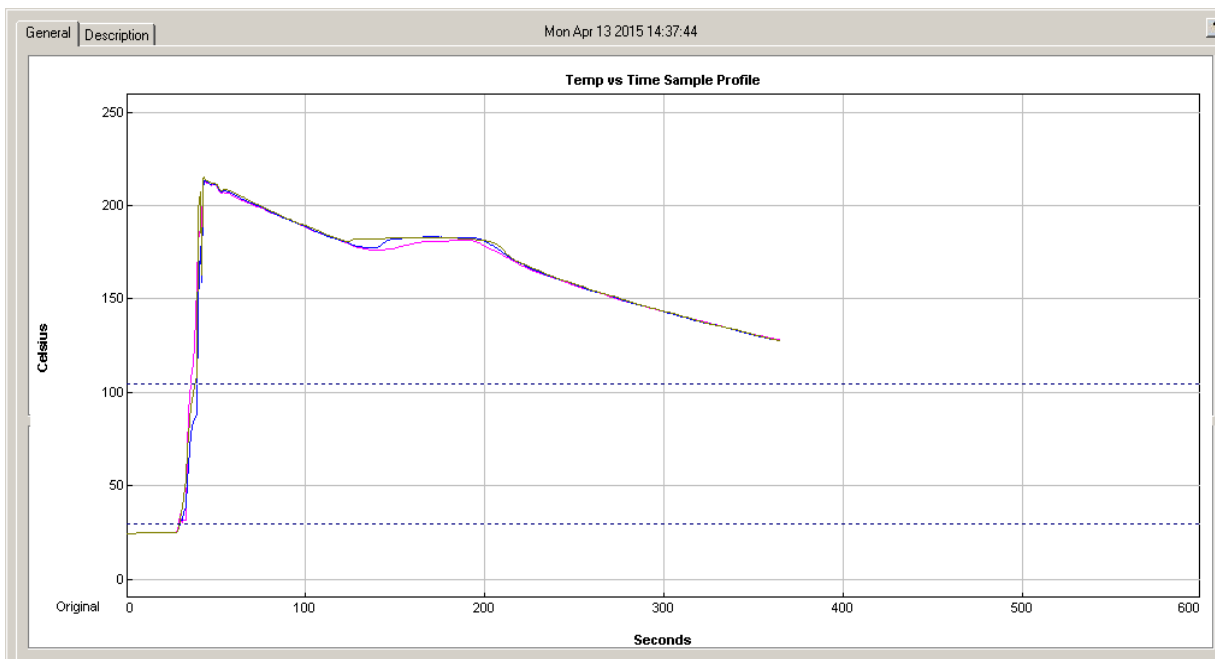
Elektronické zdroje:

- [1] DVOŘÁK, Karel: Historie svařování v českých zemích. Úvod do historie svařování. Příspěvek č. 2: POČÁTKY SPOJOVÁNÍ KOVŮ [online]. [cit. 24.3.2015].
Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=239>
- [2] SZENDIUCH, Ivan: PROBLÉM PŘECHODU NA BEZOLOVNATÉ PÁJKY [online]. [cit. 24.3.2015]. Dostupné z: <http://www.marpos.cz/leadfree.htm>
- [3] KOVOHUTĚ Příbram: [online]. [cit. 24.3.2015]. Dostupné z: http://www.kovopb.cz/userdata/pages/12/dp-solders_pb.pdf
- [4] EUTEKTIKUM, Fázový diagram eutektické směsi, [online]. [cit. 24.3.2015].
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Eutektikum>
- [5] KOVOHUTĚ Příbram: [online]. [cit. 24.3.2015]. Dostupné z: http://www.kovopb.cz/userdata/pages/12/dp-solders_lf.pdf
- [6] Materiály k realizaci úloh v předmětu Výkonové součástky a technologie [online]. [cit. 24.3.2015]. Dostupné z: http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/289/cviceni_-_I._blok/uloha_6.pdf
- [7] Multimediální výukový systém, VUT v Brně, [online]. [cit. 24.3.2015]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice/>
- [8] SMT Centrum. Pájení. Pájení přetavením [online]. [cit. 25.3.2015]. Dostupné z: http://www.smtcentrum.cz/data/Images/galleries/big/graf-pretaveni_128558293362.798.JPG

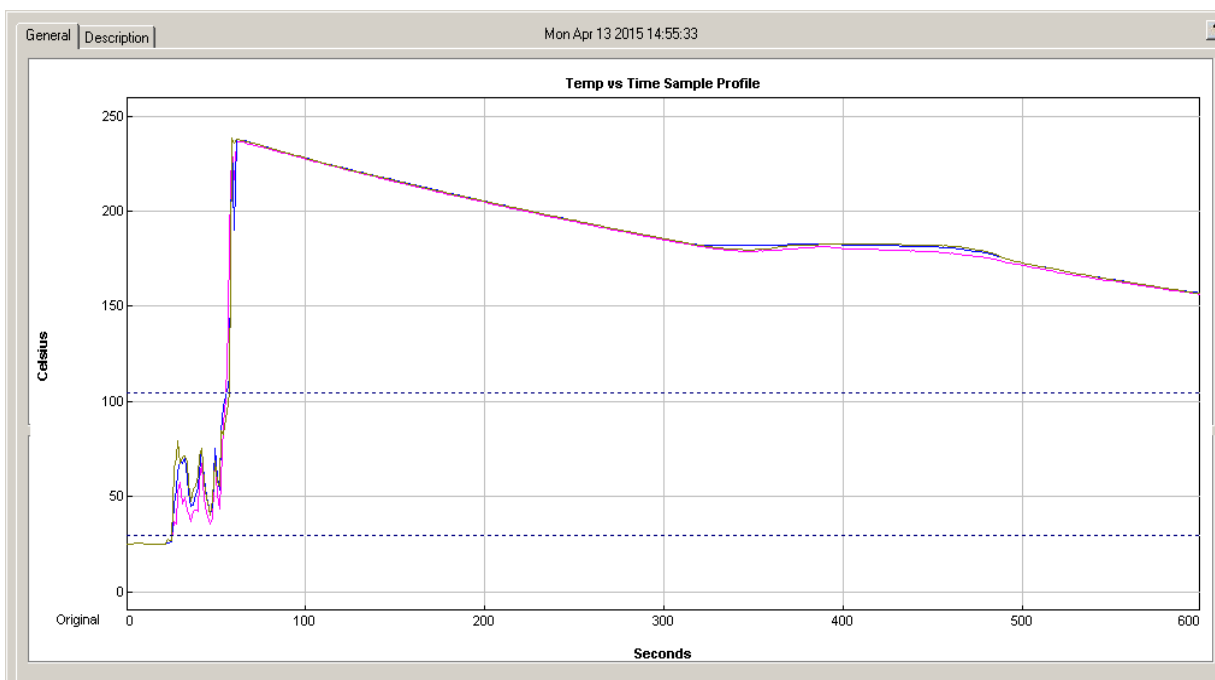
- [9] SMT Centrum. Pájený spoj, pájitelnost. Stavový diagram [online]. [cit. 25.3.2015].
Dostupné z: http://www.smtcentrum.cz/data/Images/galleries/big/eutekticka-pajka_128556967214.927.JPG,
- [10] Augustana College. The Homepage of Keith Hartman [online]. [cit. 25.3.2015].
Dostupné z: <http://ed.augie.edu/~kbhartma/scan2.JPG>
- [11] Material Measurement Laboratory. Phase Diagrams & Computational Thermodynamics [online]. [cit. 25.3.2015]. Dostupné z:
<http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/cusn-w.jpg>
- [12] InTech – Open Science | Open minds [online]. [cit. 20.4.2015]. Dostupné z:
<http://www.intechopen.com/source/html/38577/media/image18.png>
- [13] SZENDIUCH, Ivan: PROBLÉM PŘECHODU NA BEZOLOVNATÉ PÁJKY [online]. [cit. 20.4.2015]. Dostupné z: <http://www.marpos.cz/leadfree/sz4.jpg>
- [14] SMD. Připojování součástek v elektronice [online]. [cit. 20.4.2015]. Dostupné z:
<http://telefon.unas.cz/sell/image/obr1.gif>
- [16] Vedení tepla. [online]. [cit. 12.5.2015]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Vedeni_tepla
- [17] Požární odolnost, ČVUT Fakulta Stavební, [online]. [cit. 12.5.2015]. Dostupné z:
http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/1/1-2_Vedeni_tepla.pdf
- [18] Sálání [online]. [cit. 12.5.2015]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Salani>
- [21] SMT centrum. Výběr tavidel [online]. [cit. 15.5.2015]. Dostupné z:
<http://www.smtcentrum.cz/vyber-tavidel/pryskyricna-tavidla-na-bazi-kalafuny/>
- [22] SMT centrum. Výběr tavidel [online]. [cit. 15.5.2015]. Dostupné z:
<http://www.smtcentrum.cz/vyber-tavidel/synteticka-tavidla/>
- [23] SMT centrum. Výběr tavidel [online]. [cit. 15.5.2015]. Dostupné z:
<http://www.smtcentrum.cz/vyber-tavidel/tavidla-bez-cisteni/>

Přílohy:

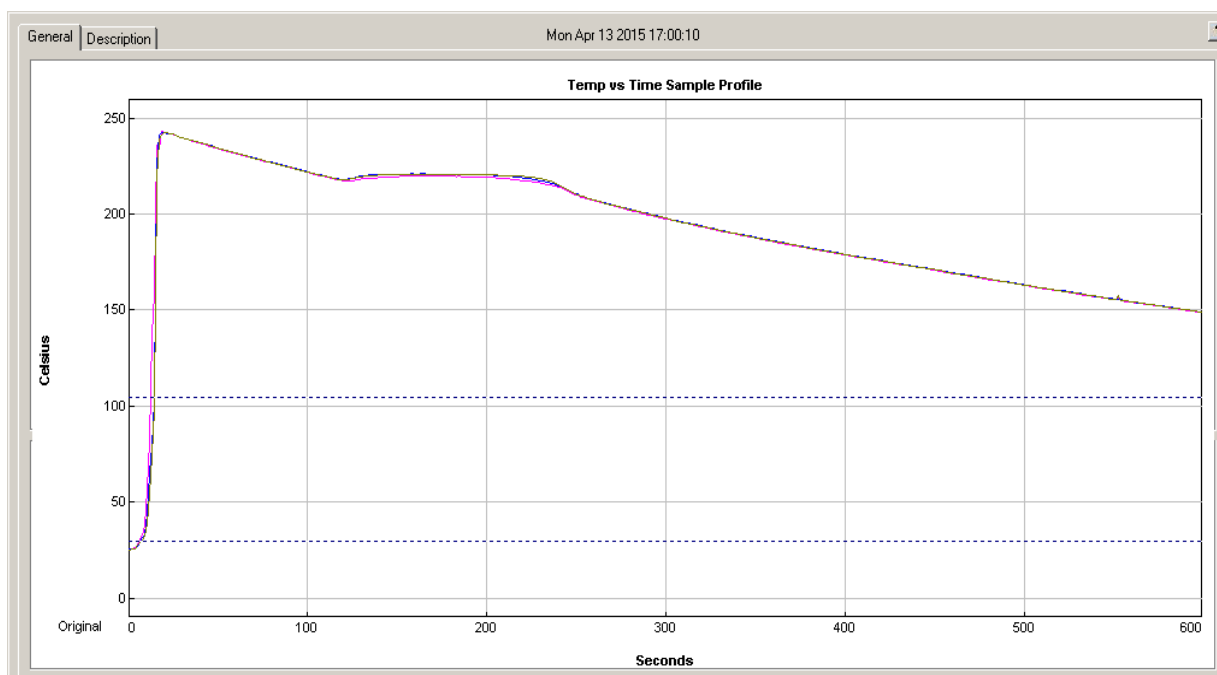
Příloha č. 1: SnPbE, vzorek 3, první měření



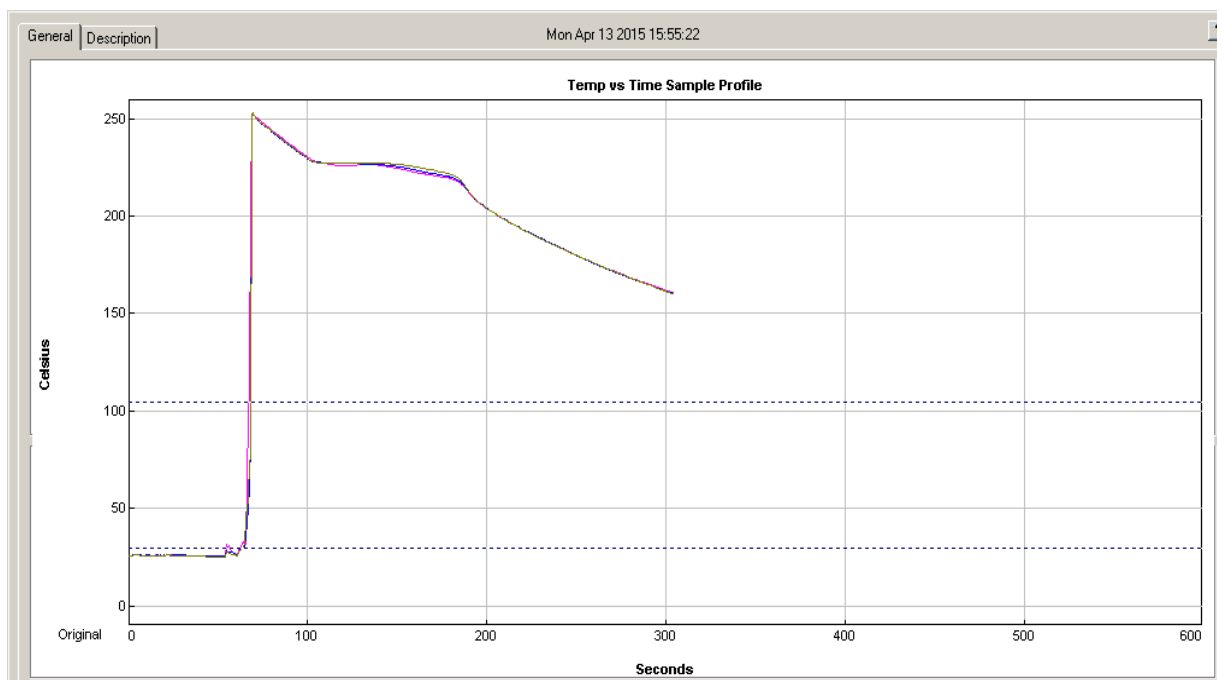
Příloha č. 2: SnPbE, vzorek 3, druhé měření



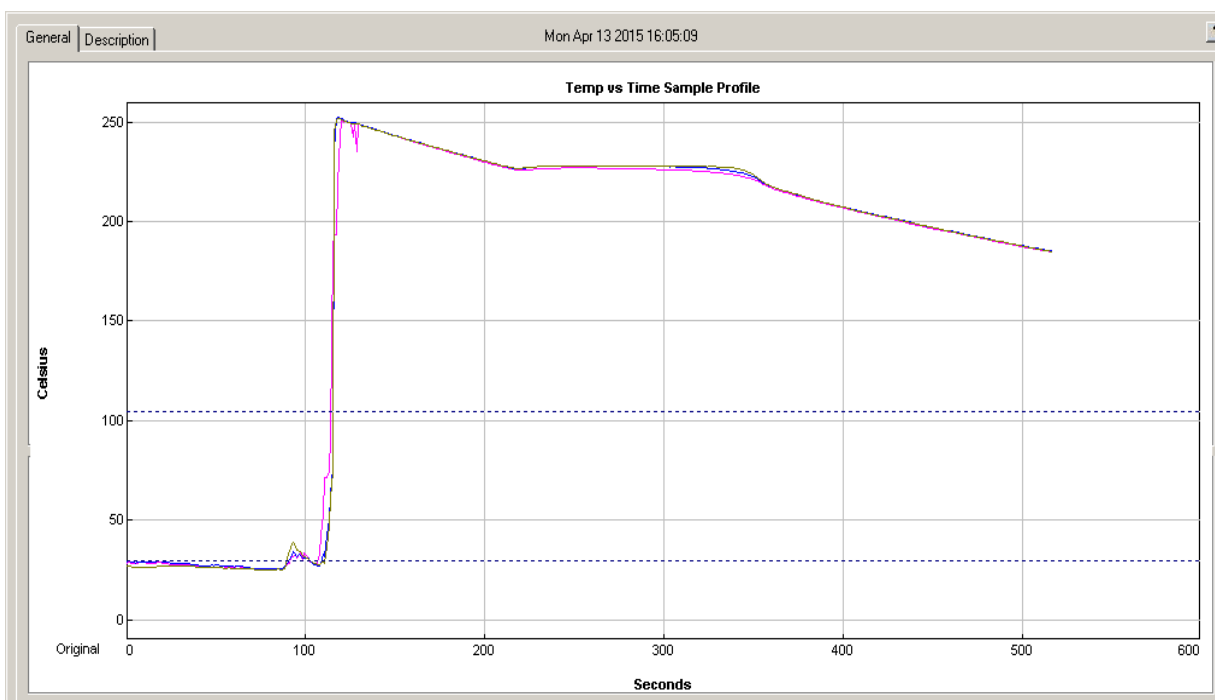
Příloha č. 3: SnAg4, vzorek 3, první měření



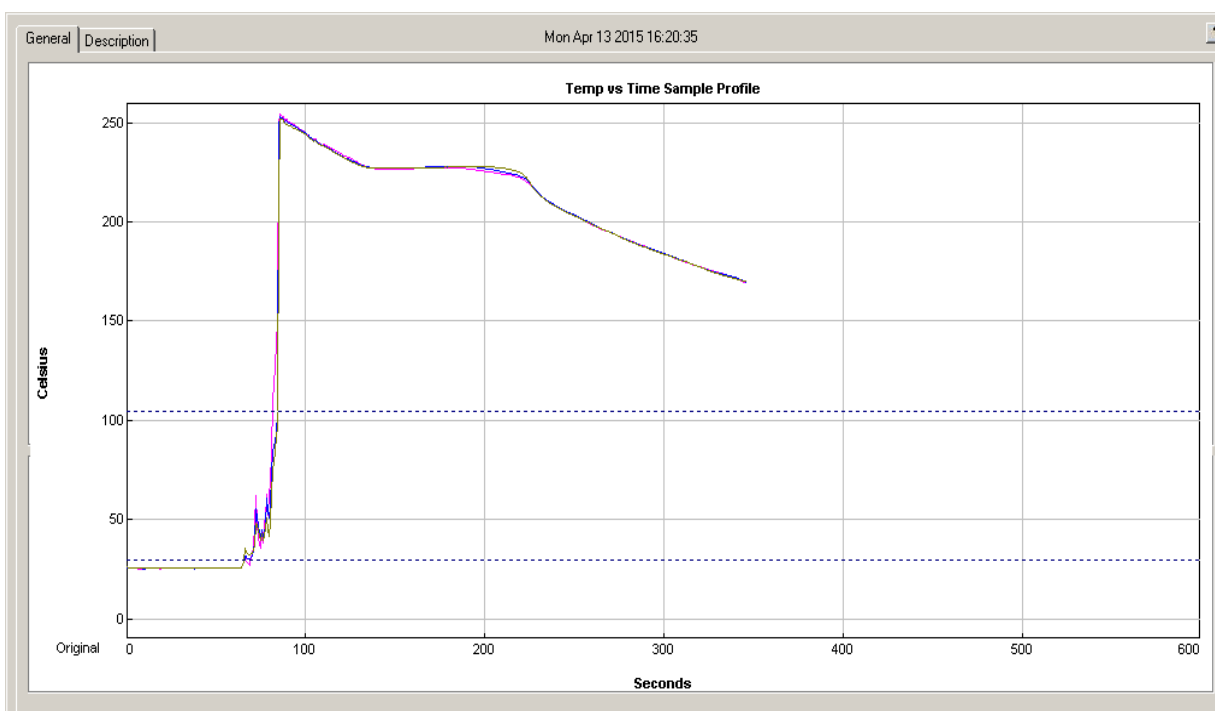
Příloha č. 4: SnCu1, vzorek 3, první měření



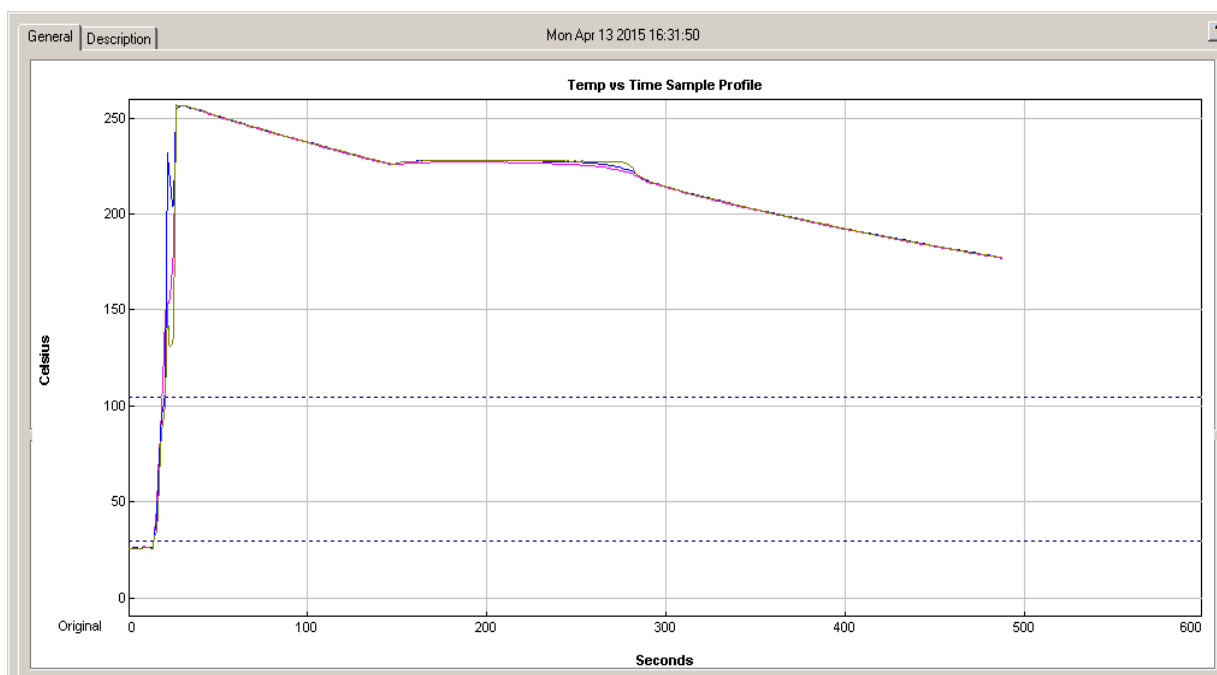
Příloha č. 5: SnCu1, vzorek 3, druhé měření



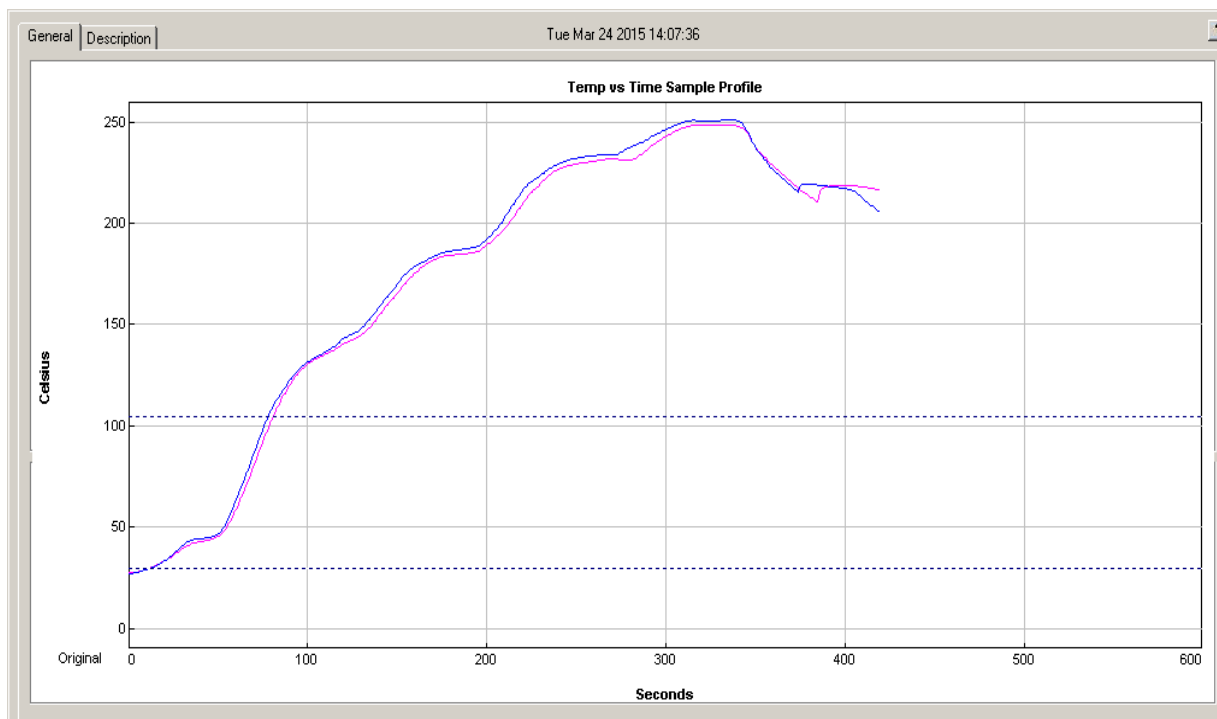
Příloha č. 6: SnCu1, vzorek 3, třetí měření



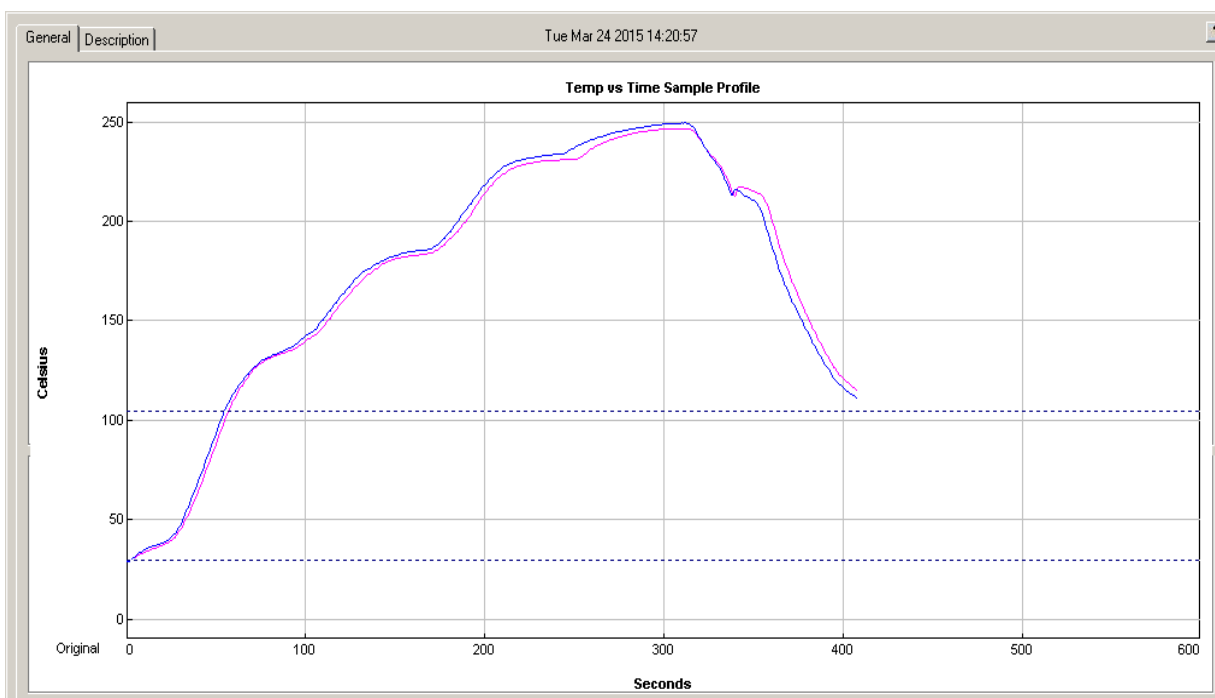
Příloha č. 7: SnCu1, vzorek 3, čtvrté měření



Příloha č. 8: SnCu07, vzorek 1, první měření



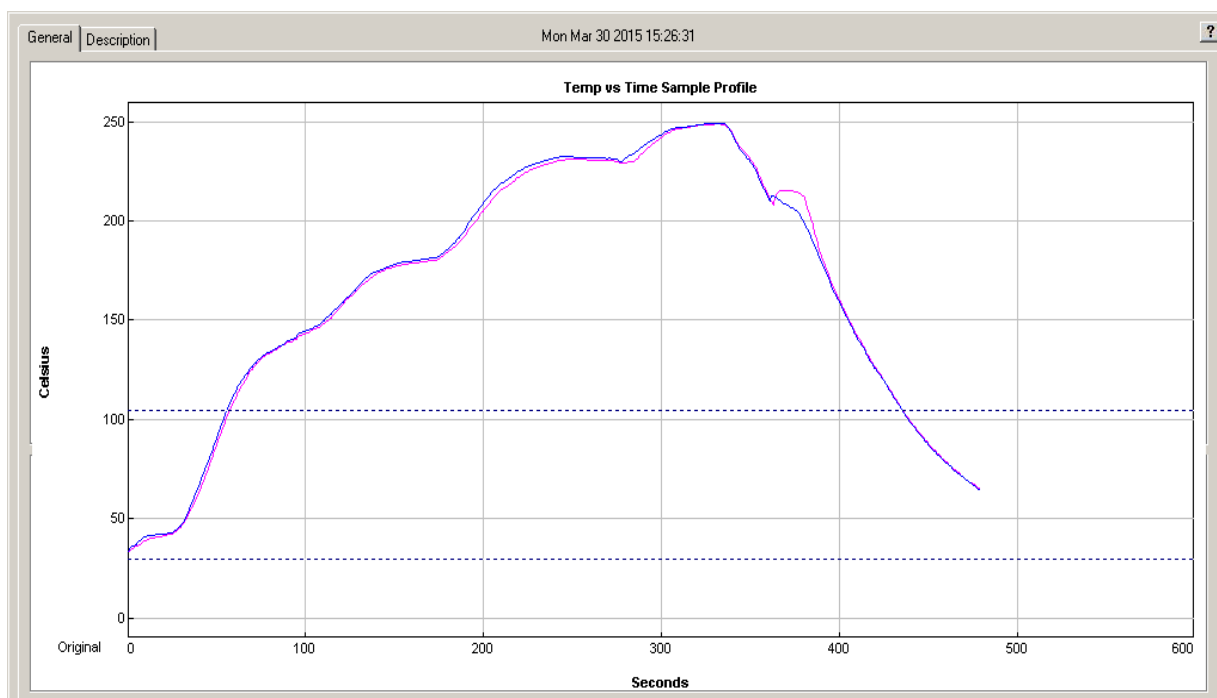
Příloha č. 9: SnCu07, vzorek 1, druhé měření



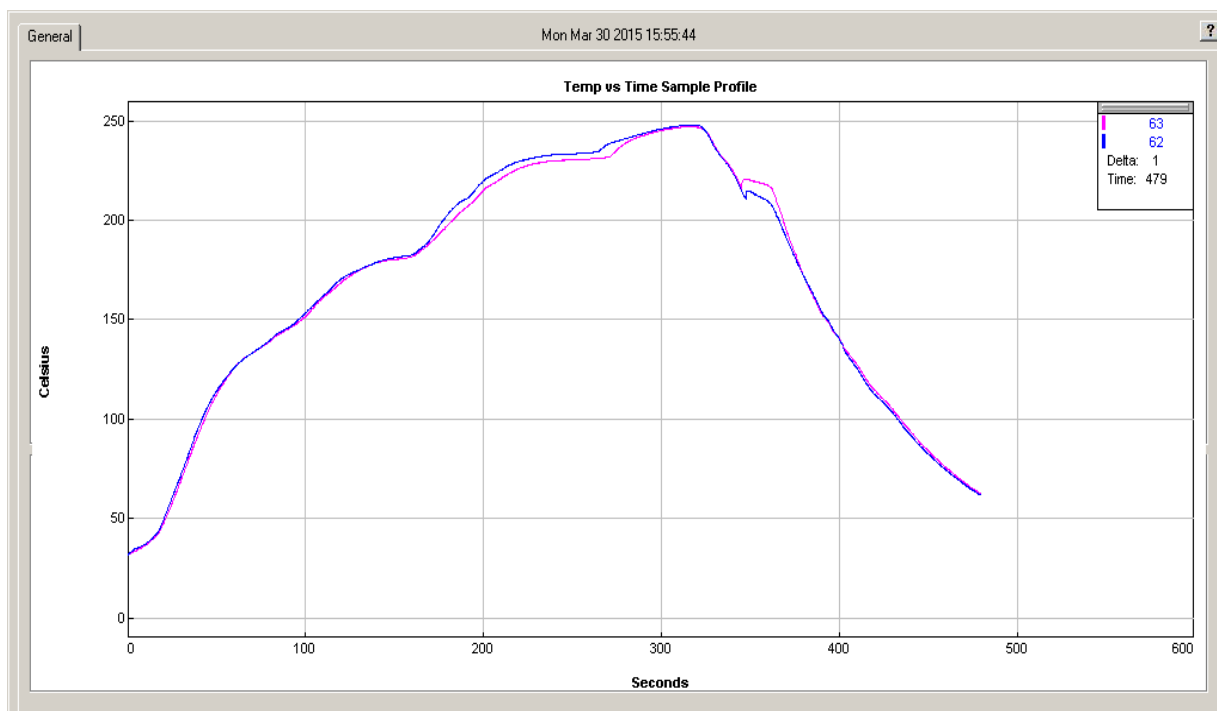
Příloha č. 10: SnCu07, vzorek 1, třetí měření



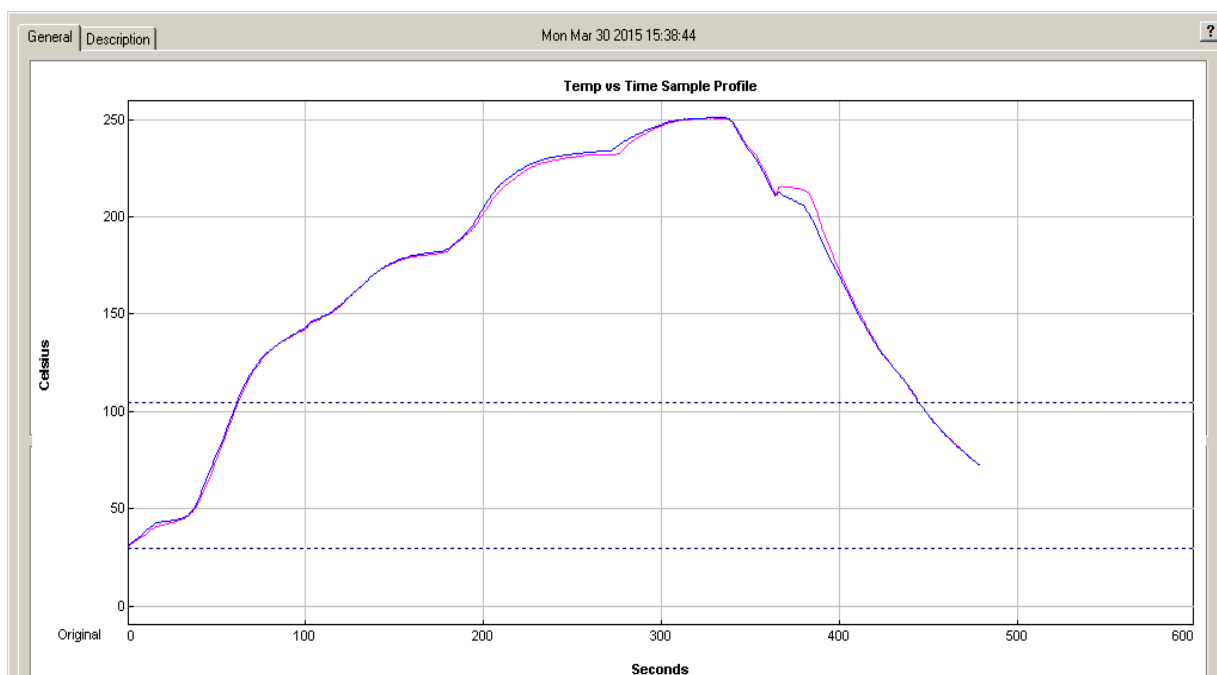
Příloha č. 11: SnCu07, vzorek 2, první měření



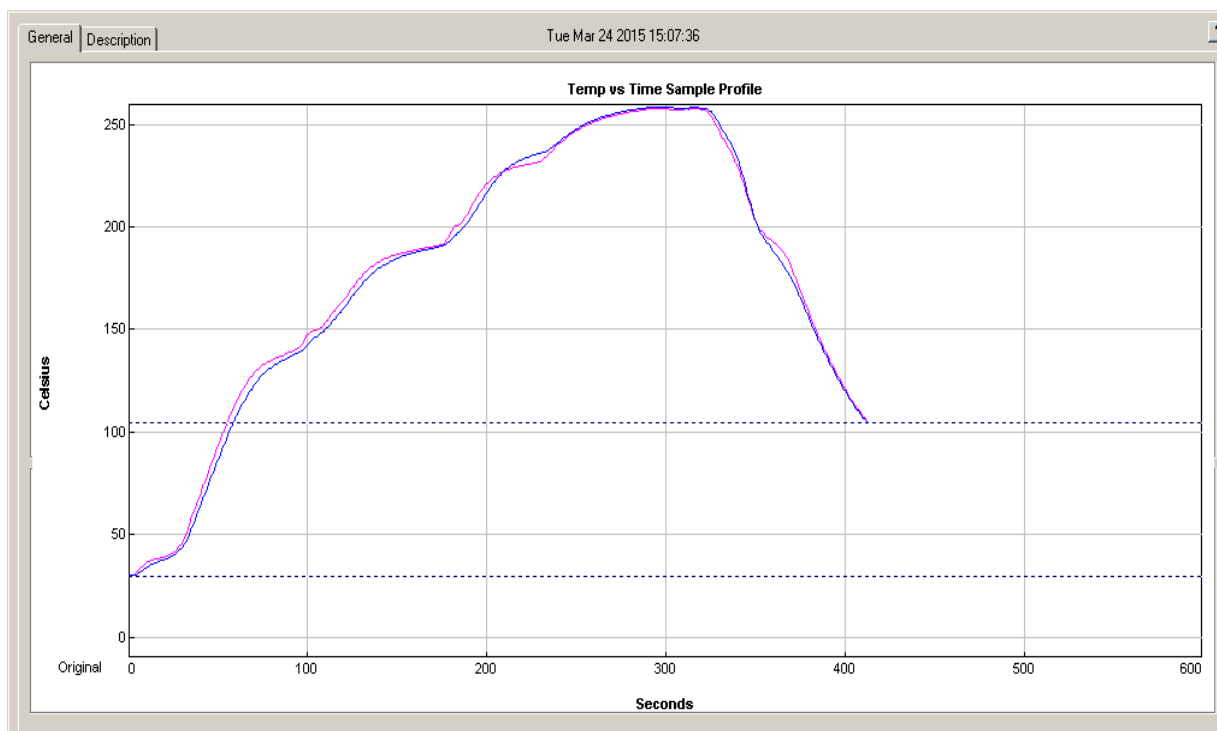
Příloha č. 12: SnCu07, vzorek 2, druhé měření



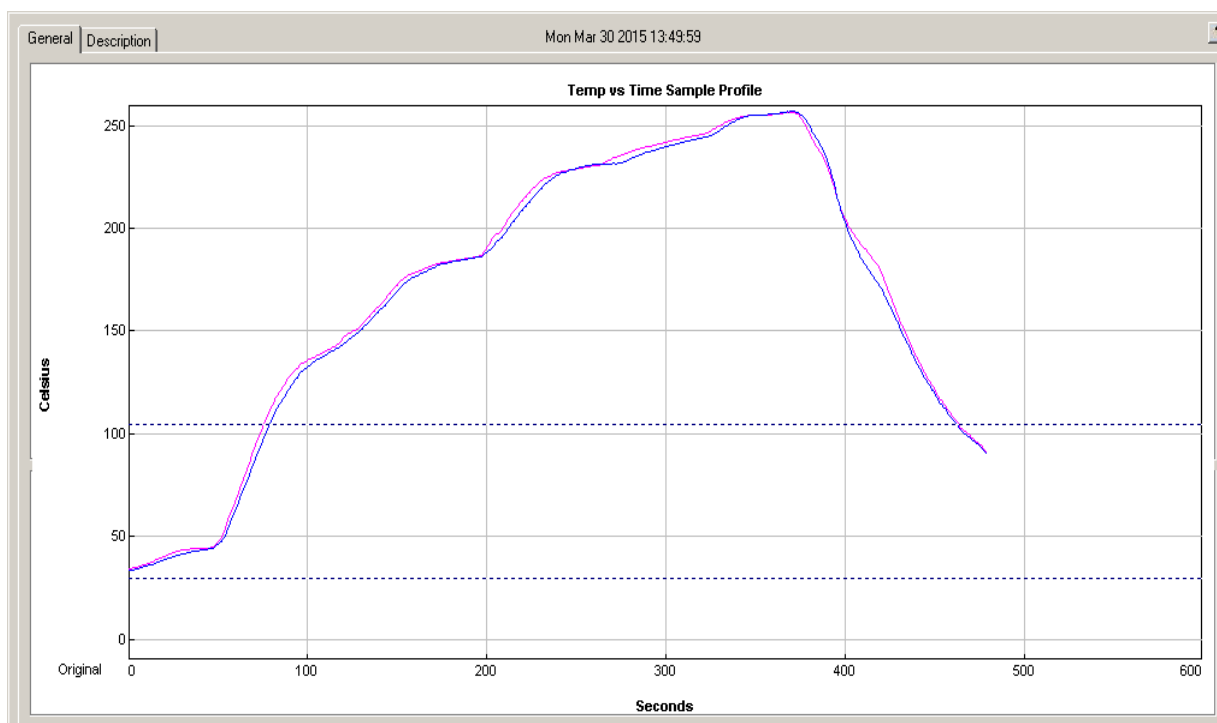
Příloha č. 13: SnCu07, vzorek 2, třetí měření



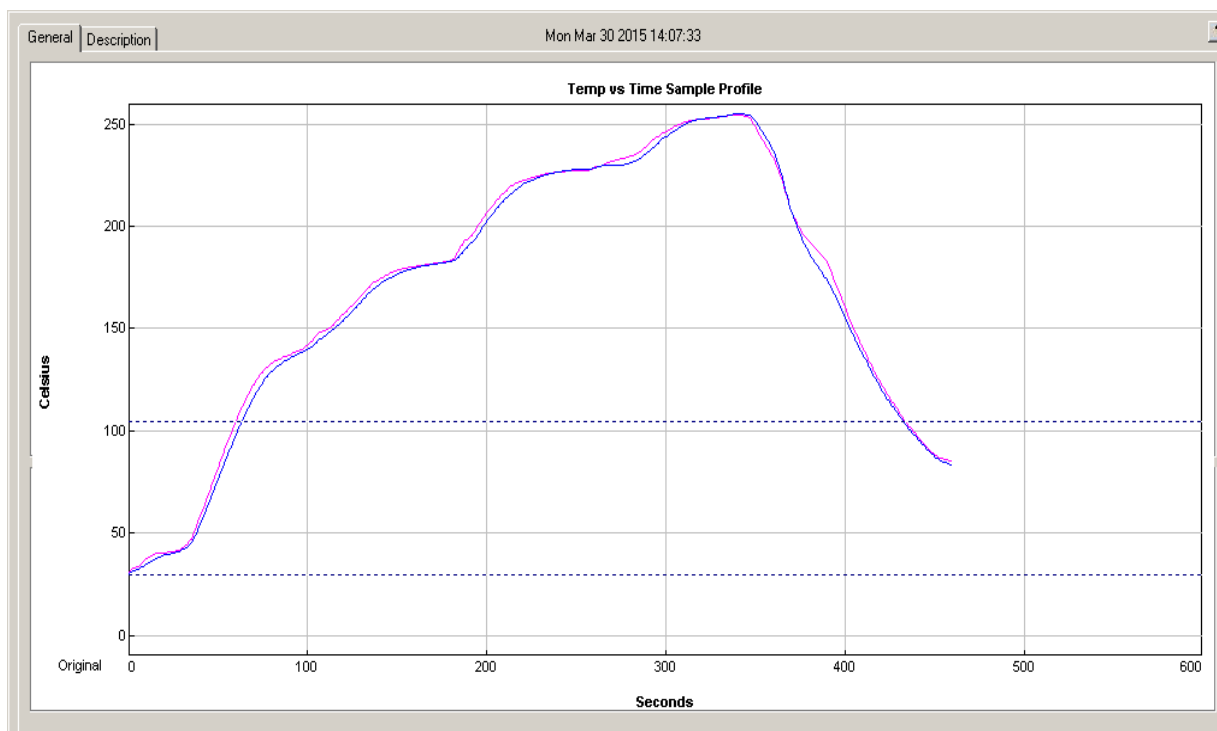
Příloha č. 14: SnAg35, vzorek 1, první měření



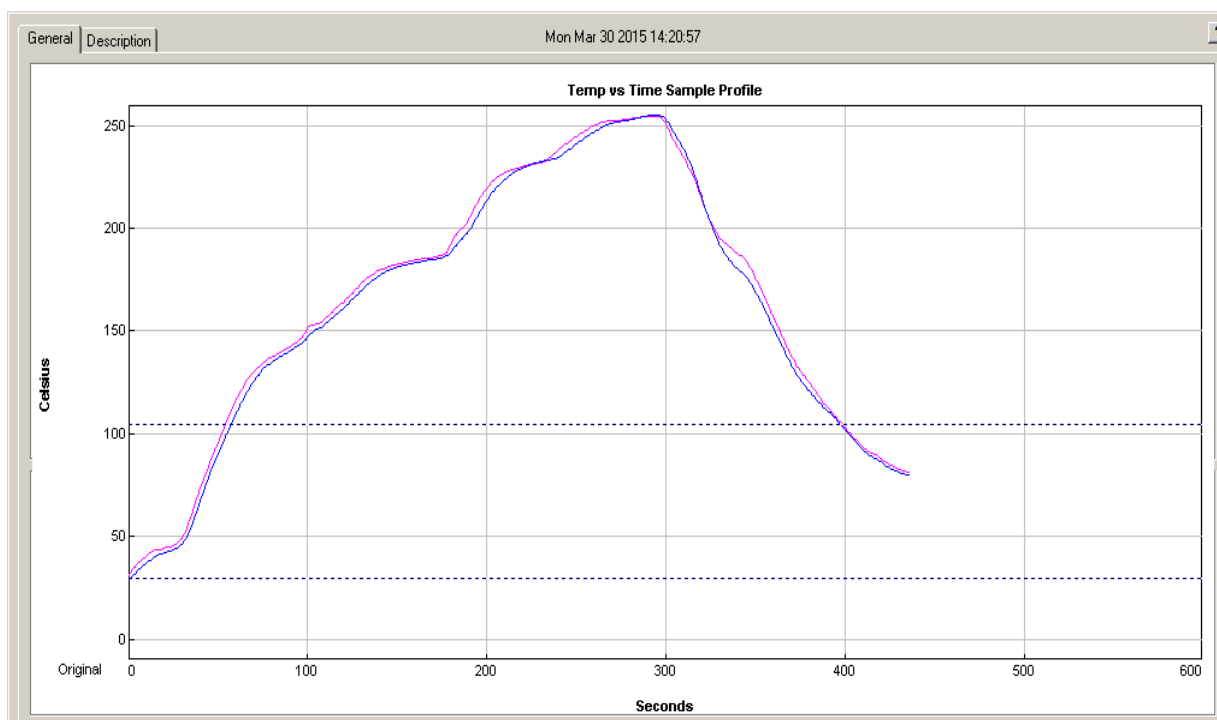
Příloha č. 15: SnAg35, vzorek 2, první měření



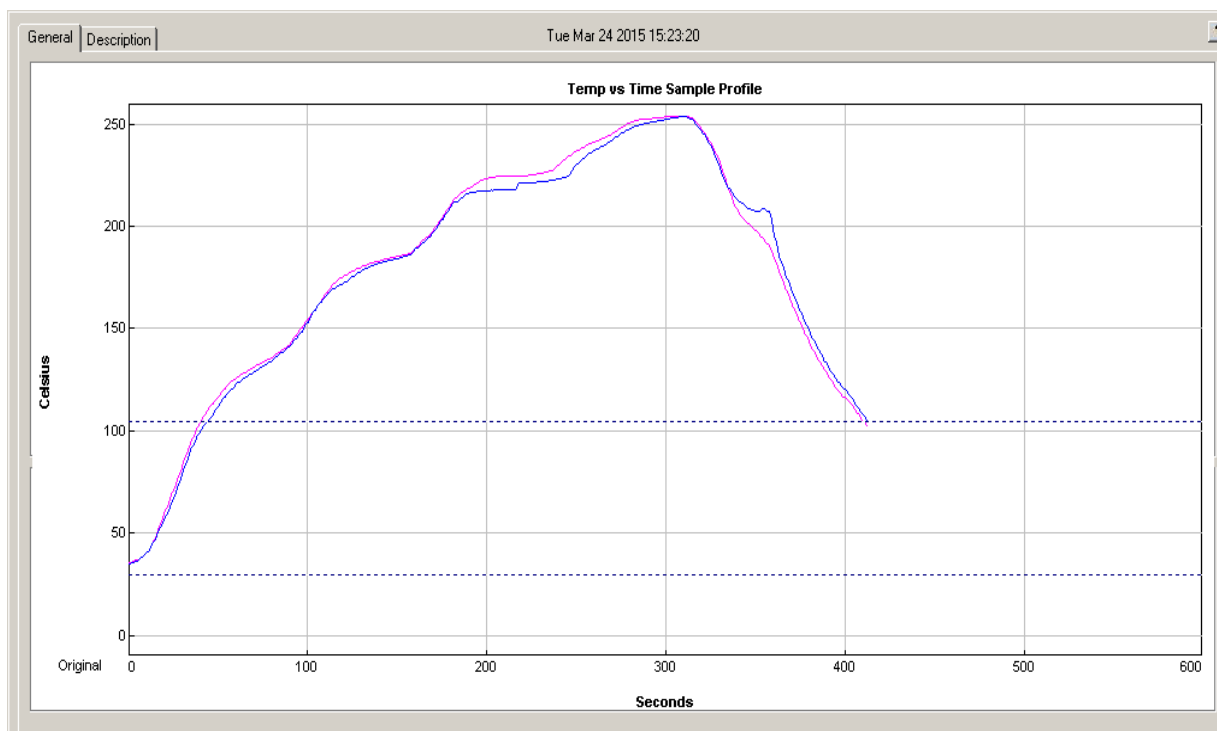
Příloha č. 16: SnAg35, vzorek 2, druhé měření



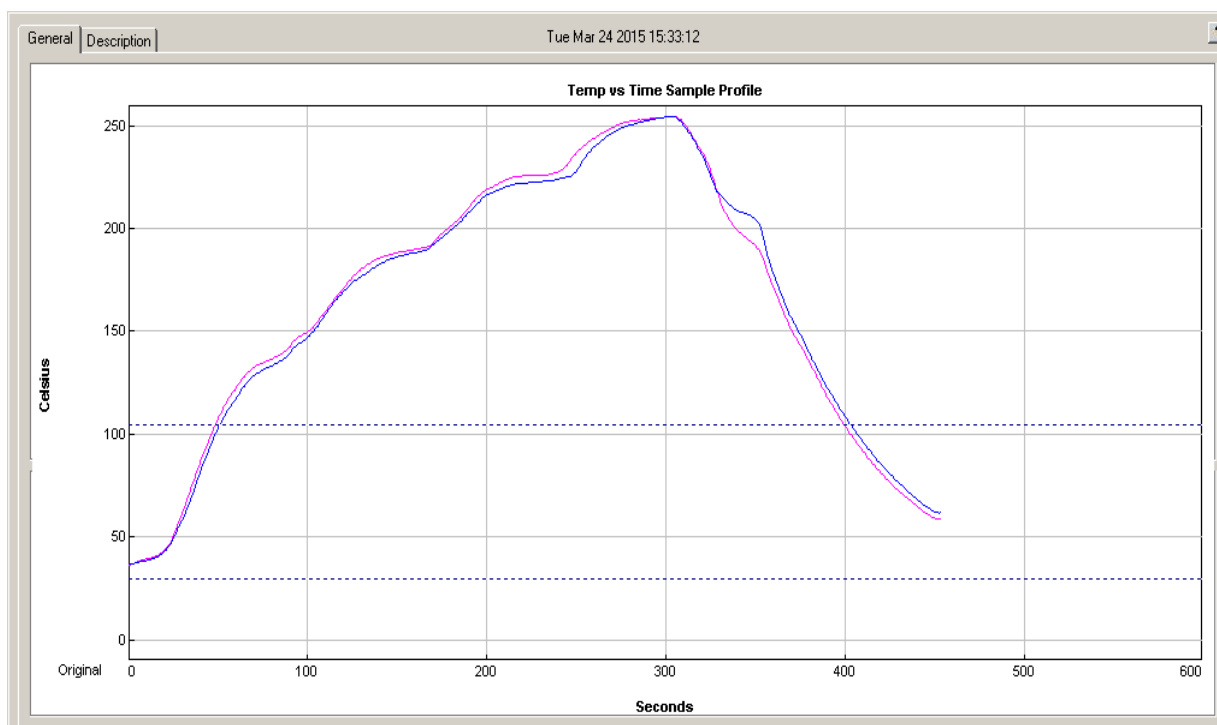
Příloha č. 17: SnAg35, vzorek 2, třetí měření



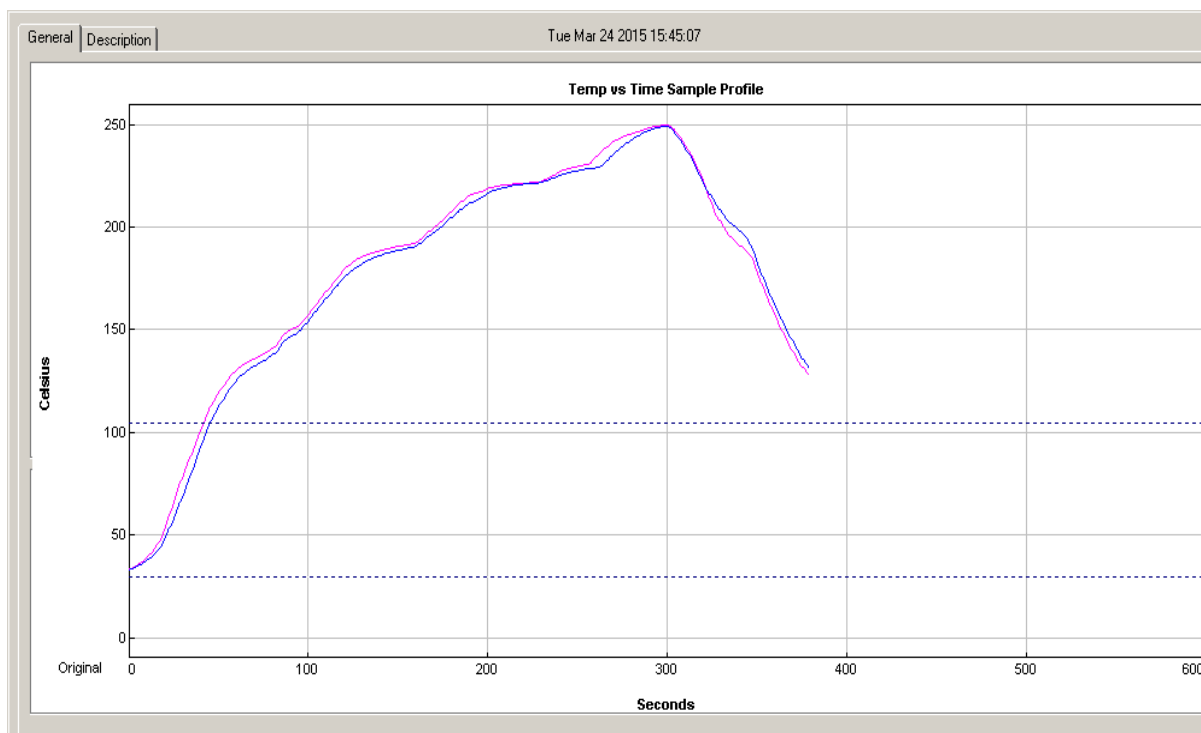
Příloha č. 18: SAC305, vzorek 1, první měření



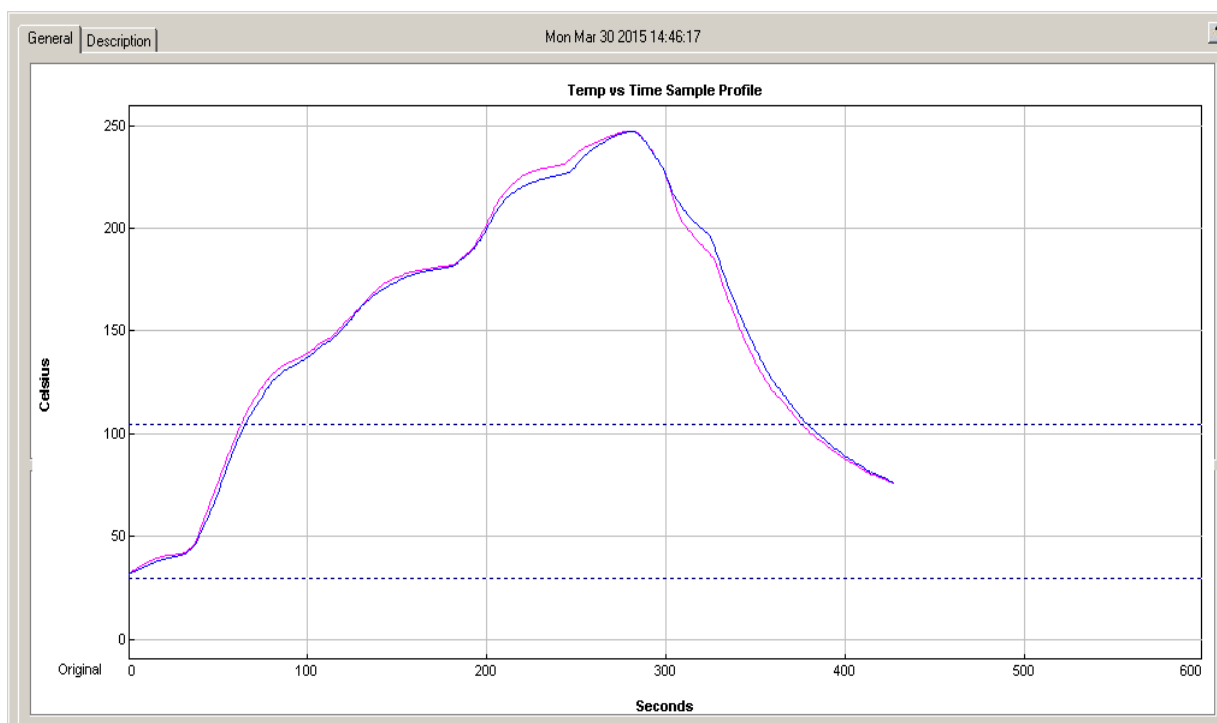
Příloha č. 19: SAC305, vzorek 1, druhé měření



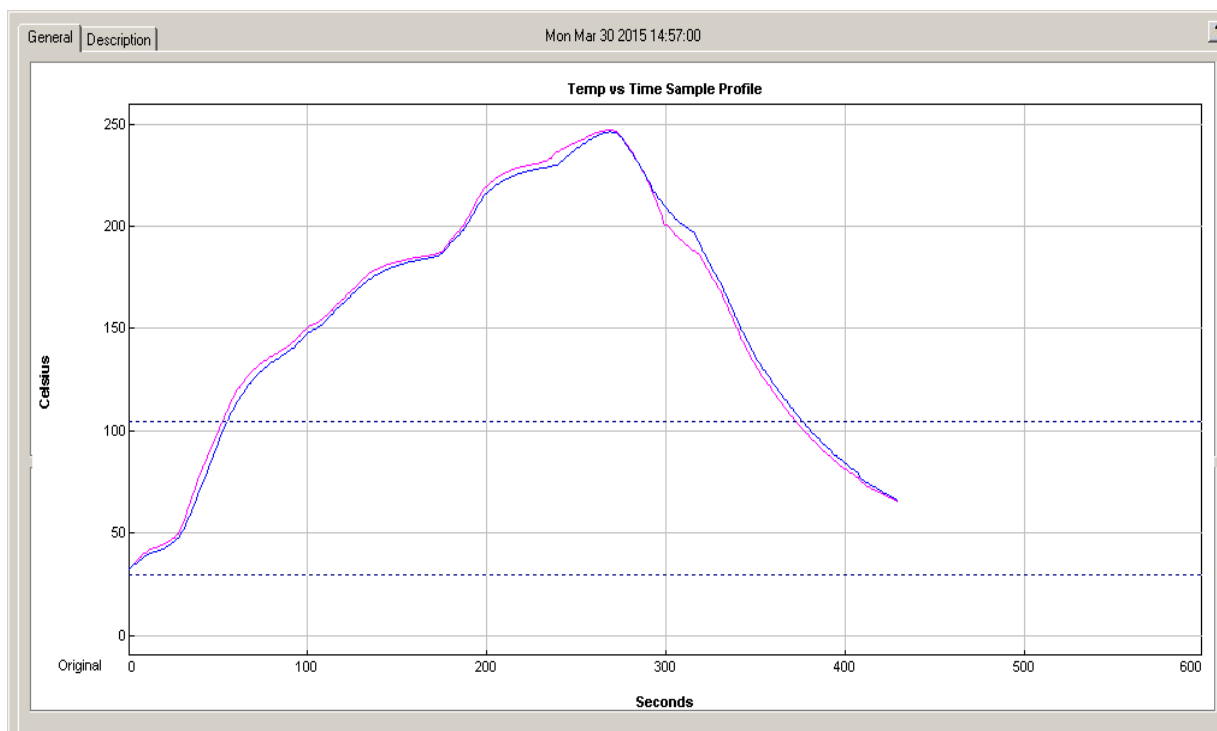
Příloha č. 20: SAC305, vzorek 1, třetí měření



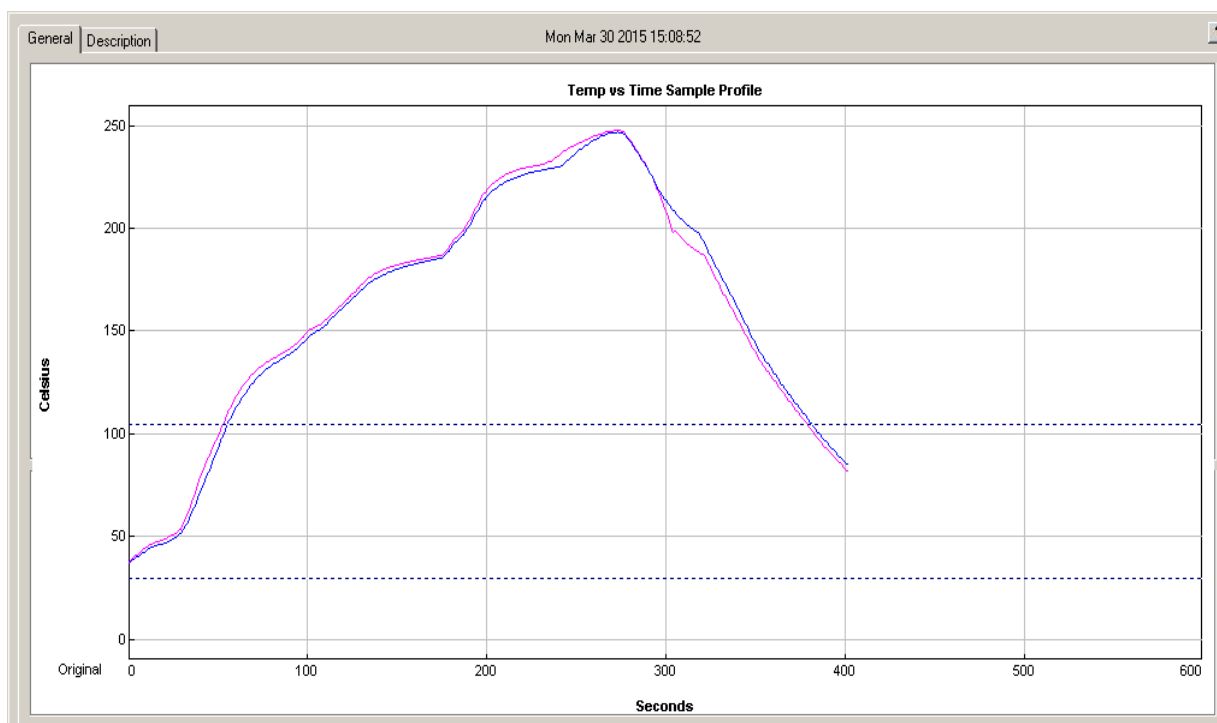
Příloha č. 21: SAC305, vzorek 2, první měření



Příloha č. 22: SAC305, vzorek 2, druhé měření



Příloha č. 23: SAC305, vzorek 2, třetí měření



Příloha č. 24: Referenční TP, vzorek 1, první měření

