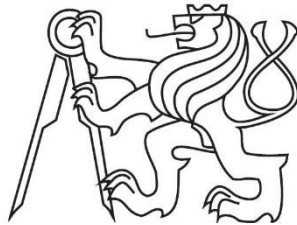


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE



Sledování chování pájecích slitin prostřednictvím
měření latentního tepla

Monitoring of solder alloys behaviour by latent heat
measurement

Diplomová práce

Bc. Vít Zahradník

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Dušek, PhD.

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Zahradník	Jméno: Vít	Osobní číslo: 382603
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická		
Zadávací katedra/ústav:	Katedra elektrotechnologie		
Studijní program:	Elektrotechnika, energetika a management		
Studijní obor:	Technologické systémy		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Sledování chování pájecích slitin prostřednictvím měření latentního tepla

Název diplomové práce anglicky:

Monitoring of solder alloys behaviour by latent heat measurement

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií pájení v elektrotechnice, základními typy pájecích slitin a jejich vlastnostmi.
- 2) Seznamte se s teplotním profilem u pájení přetavením a termickými vlastnostmi pájecích slitin.
- 3) Pokuste se experimentálně změřit vliv latentního tepla jednoho a více pájených spojů s ohledem na okolní teplotu.
- 4) Výsledky experimentů vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

[1] L. Ptáček a kol.: Nauka o materiálu I., Akademické nakladatelství CERM, Brno 2001.
[2] K. J. Puttlitz, K. A. Stalter: Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies, Marcel Dekker, Inc., NEW YORK - BASE (2004), Vol. 1, pp. 851 - 915
[3] X. Li, F. Zhang, F. Zu, X. Luv, Z. Zhao, D. Yang, J. Alloys and Compounds 505, 472 (2010)
[4] J.-C. Zhao: Methods for Phase Diagram Determination, ELSEVIER, ISBN: 978-0-08-044629-5, 5.5. 2011

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Karel Dušek Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **17.02.2017** Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

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 doc. Ing. Karlu Duškovi PhD. a kolegovi Ing. Martinu Plačkovi za cenné rady, odborné připomínky a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům, kteří mi poskytovali morální podporu po celou dobu mého studia.“

Anotace

Práce pojednává o šíření latentního tepla při pájení přetavením z dvou pájecích slitin, olovnaté Sn37Pb a bezolovnaté SAC387. Nejdříve je část věnována teoretické problematice pájení, vzniku pájeného spoje a intermetalických sloučenin, dále vzniku defektů a jejich minimalizaci. Další část se věnuje olovnatým a bezolovnatým pájecím slitinám, jsou probrány jejich výhody, nevýhody a forma použití. V následující kapitole je popsána technologie pájení, zejména pájení přetavením, dále teplotní profil se zaměřením na latentní teplo. V poslední teoretické kapitole se práce věnuje problematice šíření tepla vedením, prouděním a sáláním. Slitiny byly vícenásobně přetaveny a změřené teplotní profily byly mezi sebou porovnány. Další porovnání se týkalo šíření tepla na modelové desce a ovlivnění sousedních pájených plošek.

Klíčová slova

technologie pájení, pájení přetavením, pájený spoj, olovnaté pájecí slitiny, bezolovnaté pájecí slitiny, intermetalické sloučeniny, teplotní profil, latentní teplo, šíření tepla, nukleace, rekalescence, Sn37Pb, SAC387

Annotation

This thesis deals with transfer of latent heat during reflow soldering of two solder alloys, lead Sn37Pb and lead-free SAC387. First part is focused on theoretical problems of soldering, the formation of soldered joint and intermetallic compounds also of defects and how to minimize these defects. The next part deals with lead and lead-free solder alloys, their advantages, disadvantages and application form. The following part describes the soldering technology, especially the reflow soldering and temperature profile focusing on latent heat. The last theoretical part is focused on the transfer of heat conduction, convection and radiation. The alloys were multiple remelted and measured temperature profiles were compared. Another comparison related was about heat transfer through model printed circuit board and influence of adjacent brazed joints.

Key words

technology of soldering, reflow soldering, brazed joint, lead solder alloys, lead-free solder alloys, intermetallic compounds, temperature profile, latent heat, transfer heat, nucleation, recalescence, Sn37Pb, SAC387

Obsah

1. ÚVOD	11
2. PÁJENÍ	12
2.1 PROCES PÁJENÍ.....	12
2.2 INTERMETALICKÁ FÁZE	13
2.3 FÁZOVÉ DIAGRAMY	14
2.3.1 Fázový diagram cín – olovo (SnPb).....	14
2.3.2 Fázový diagram cín – stříbro (SnAg).....	15
2.3.3 Fázový diagram cín – měď (SnCu)	16
2.3.4 Fázový diagram cín – stříbro – měď (SnAgCu).....	16
2.3.5 Fázový diagram cín - olovo - měď (SnPbCu)	17
2.4 DEFEKTY PÁJENÍ.....	18
2.4.1 Studený spoj	19
2.4.2 Posunutí součástky.....	19
2.4.3 Tombstone effect	19
2.4.4 Zkrat	20
3. PÁJECÍ SLITINY	20
3.1 OLOVNATÉ PÁJECÍ SLITINY.....	20
3.2 BEZOLOVNATÉ PÁJECÍ SLITINY	22
3.3 FORMA PÁJKY	23
3.4 TAVIDLA.....	23
4. TECHNOLOGIE PÁJENÍ	25
4.1 RUČNÍ PÁJENÍ.....	25
4.2 PÁJENÍ VLNOU.....	25
4.3 PÁJENÍ ULTRAZVUKEM	26
4.4 PÁJENÍ PŘETAVENÍM.....	26
4.5 TEPLTNÍ PROFIL	28
4.5.1 Latentní teplo	29
5. ŠÍŘENÍ TEPLA	30
5.1 PŘENOS TEPLA VEDENÍM (KONDUKCI)	31
5.2 PŘENOS TEPLA PROUDĚNÍM (KONVEKCI).....	32
5.3 PŘENOS TEPLA SÁLÁNÍM (RADIACÍ)	33
6. MĚŘENÍ LATENTNÍHO TEPLA	35
6.1 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ.....	35

6.2 ZMĚŘENÉ TEPLOTNÍ PROFILY.....	37
6.2.1 Teplotní profily slitiny Sn37Pb	37
6.2.2 Teplotní profily slitiny SAC387	43
7. ZÁVĚR	49
8. SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK:	51
9. LITERATURA:.....	52
9.1 KNIŽNÍ ZDROJE:	52
9.2 ELEKTRONICKÉ ZDROJE:	52
10. VYBRANÉ PŘÍLOHY.....	55
10.1 PŘÍLOHY – REFERENČNÍ TEPLOTNÍ PROFIL – BEZ SLITINY.....	55
10.2 PŘÍLOHY SLITINY SN37PB	55
10.3 PŘÍLOHY SLITINY SAC387	66

1. Úvod

Pájení se v elektrotechnice používá ke spojování kovových částí obvodů a je důležitou součástí technologického procesu. Problematice pájení a pájecích slitin se věnují práce po celém světě, protože je nedílnou částí většiny průmyslových výroben, a proto se zde klade důraz zejména na kvalitu.

Tato práce se zabývá chováním pájecích slitin při fázové přeměně z kapalné na tuhou formu. Nejprve je v práci zmíněn vznik pájeného spoje, tvorba chemických vazeb a podmínky pro jejich vytvoření. Dále jsou vysvětleny pojmy intermetalické fáze a fázové diagramy vybraných slitin. Ke konci první kapitoly jsou zmíněny ještě nejčastěji se vyskytující defekty pájení.

V druhé kapitole se práce zabývá materiály, které se používají v pájení. Jedná se o olovnaté a bezolovnaté pájecí slitiny, jejich používaná forma a nejčastější tavidla.

V další kapitole je popsána technologie pájení, ve které je zmíněno ruční a strojní pájení, jejich výhody, nevýhody a použití. Na konci kapitoly jsou vysvětleny pojmy teplotního profilu a následně latentního tepla. Latentní teplo a jeho průběh je vysvětlován na chladnutí čistého cínu, dále pak i na cínových pájecích slitinách používaných v elektrotechnice.

Ve čtvrté kapitole jsou vysvětleny principy šíření tepla vedením, prouděním a radiací.

Poslední kapitola se věnuje samotnému měření teplotních profilů olovnaté pájecí slitiny Sn37Pb a bezolovnaté slitině SAC387 na modelové desce plošných spojů. Dále se zaměřuje na vícenásobné přetavení vzorků a porovnávám jejich vliv v různých variantách.

2. Pájení

Přibližně před 5 tis. lety uměli egyptští zlatníci spojovat zlaté předměty. O tisíc let později bylo objeveno pájení cínem, čímž se například spojovaly olověné vodovodní trubky. Dodnes prošla technologie pájení razantním vývojem, kdy jsou postupy pájení uzpůsobeny druhu pájení, použité pájce, oblasti použití a je brán ohled i na ekologii použitých materiálů. [1]

2.1 Proces pájení

Pájení je způsob metalurgického spojování materiálů pomocí kovu s nižší teplotou tání než spojované materiály. Pájení můžeme rozdělit do dvou kategorií – tvrdé, kdy je teplota tání nad cca 450 °C a měkké, při kterém teplota dosahuje maximálně 450 °C. U tvrdého pájení záleží zejména na mechanické pevnosti spoje, zatímco u měkkého pájení, využívaného v elektrotechnice, záleží jak na mechanické pevnosti, tak na elektrických vlastnostech spoje.

Při pájení probíhají složité chemicko-fyzikální procesy. Mezi tekutou pájkou a tuhým povrchem se vytvářejí vazby a postupně se zmenšuje povrchové napětí mezi materiály, tento jev se nazývá smáčení. Dobré smáčení si lze představit jako děj, při kterém voda přilne např. ke skleněnému povrchu, naopak když voda klouže po povrchu, např. po naimpregnované stanové plachtě, dochází ke špatnému smáčení. Naimpregnovanou plachtu lze nazvat jako vodou nesmáčivou. Dochází tedy ke smáčení kapky pájky s pevným povrchem. V tomto stádiu reaguje pájený předmět s pájkou a na rozhraní se vytváří vrstva tvořící vazbu mezi tuhým a tekutým fází. Přiváděným teplem se atomy obou složek spoje rozkmitávají a jejich vzájemná difúze zpevňuje vytvořenou vazbu. Při chladnutí krystalizace upevňuje a zastavuje difúzní jevy.

Pájené spoje můžeme rozdělit na bezdifúzní, difúzní s rozpouštěním a disperzní. Bezdifúzní pájený spoj vzniká nedostatečným nebo brzo přerušným dodáním tepla během vytváření chemických vazeb. Při tomto přístupu je difúze mezi pájeným materiálem a pájkou zanedbatelná.

Difúzní pájený spoj s rozpouštěním vznikne při trvalejším smáčení. Kromě difúze probíhá jak rozpouštěním pájeného materiálu, tak pájky. K rozpouštění materiálů dochází v omezené, nebo neomezené míře. Při vhodně zvolených materiálech vznikne eutektická slitina, která je

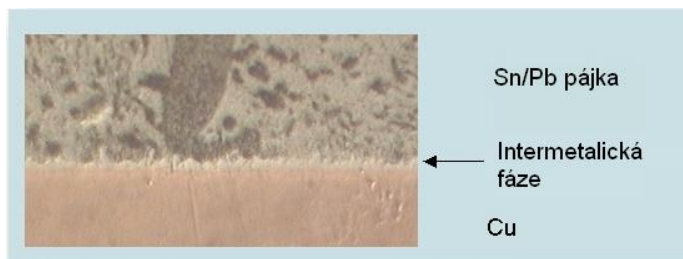
tvořena materiály tuhnoucími ve společné krystalické mřížce, čímž je tvořen monokrystalický materiál.

Disperzní pájený spoj vzniká u kovů, které jsou vzájemně chemicky nedotknutelné, ani si netvoří žádnou vazbu. Ten je vytvořen za pomoci materiálu s nižší teplotou tání, který při roztavení zatéká do mikroskopických kapilár v tuhém tělese a je tím dosaženo pevného spoje.

V elektrotechnice je využíván zejména difuzní pájený spoj s rozpouštěním. Během tvorby pájeného spoje dochází k vyrovnání povrchových napětí. S procesem pájení a difúze je spojena tvorba intermetalických sloučenin. [24]

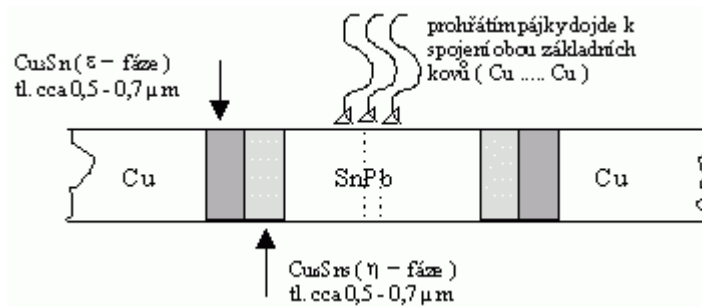
2.2 Intermetalická fáze

Tvorba intermetalické vazby je většinou základ pro vytvoření kvalitního pájeného spoje. Mezi různými pájenými materiály a pájecími slitinami se během pájení tvoří různé intermetalické sloučeniny více či méně žádané. Pro demonstraci, nechť máme pájecí slitinu Sn-Pb, v eutektickém složení Sn63Pb a nejrozšířenější DPS (deska plošných spojů) s měděnou ploškou.



Obr. 2.2a – příklad intermetalické fáze [13]

Vytvořením sloučeniny Cu_6Sn_5 mezi pájkou a pájenou ploškou je zajištěno dobré smáčení a vytvoření kvalitního spojení kovu a slitiny. Vrstva sloučeniny Cu_6Sn_5 má tloušťku několik desetin mikronu a vytváří se na rozhraní pájky a mědi, pokud je povrch smáčen velmi rychle (obr. 2.2a). Tato sloučenina má světle šedou barvu, ve fázovém diagramu Sn-Pb se značí jako fáze η a vytváří se i během chladnutí, tzn. při teplotě nižší, než je teplota tání pájky, což způsobuje difúze atomů cínu do mědi a atomů mědi do pájky. Růstem vrstvy je pájka ochuzována o cín a tím se stává obohacenou o olovo a další difúze cínu do mědi je zpomalována.



Obr. 2.2b - příklad intermetalické fáze 2 [14]

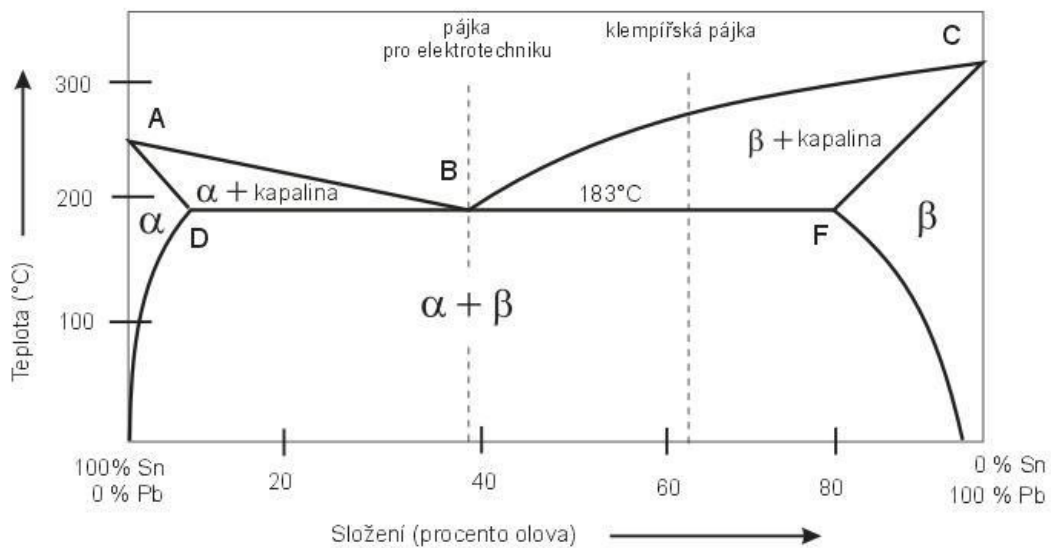
Za určitých podmínek vzniká další intermetalická sloučenina Cu_3Sn , která obsahuje více mědi než předchozí a z obr. 2.2b je zřejmé, že vzniká mezi sloučeninou Cu_6Sn_5 a měděným materiálem. Má tmavě šedou barvu a je pro výše uvedenou pájku dokonale nesmáčivá. Pájkou Sn63Pb je sloučeninu Cu_3Sn možné smáčet pouze tehdy, existuje-li na ní vrstva sloučeniny Cu_6Sn_5 . Tato druhá intermetalická vrstva vzniká, pokud je umožněna difúze mědi do pájky, a naopak je zamezeno difúzi cínu do mědi. Tato vrstva má teplotu tání vyšší než 670°C (Cu_6Sn_5 má 415°C) a ve fázovém diagramu se značí jako fáze ϵ . Tloušťka obou vrstev závisí na teplotě pájení a na době pájení.

2.3 Fázové diagramy

Fázový diagram popisuje závislosti stavových veličin látek. Jsou zobrazovány závislosti $p - T$, tj. závislost tlaku p na teplotě T , závislosti $p - V$, tj. závislost tlaku p na objemu V , i závislosti $T - V$ (závislost teploty T na objemu V), také závislosti $T - S$ (teplota T na entropii S) a další. Zde budou probírány fázové diagramy vyjadřující závislosti skupenství slitin na teplotě. [16]

2.3.1 Fázový diagram cín – olovo (SnPb)

Ve fázovém diagramu cín – olovo (Obr. 2.3.1.) je zřejmé, že v bodě B (přibližně při obsahu 37 % olova) je nejnižší bod křivky tavení, která má v tomto případě tvar širokého písmene „V“. Oblast nad křivkou se nazývá oblast liquidu, pod křivkou je oblast solidu. Body A a C vyjadřují teploty tání obou materiálů v čistém stavu. V oblasti α jsou v krystalové mřížce cínu plně rozpuštěny atomy olova a v oblasti β jsou v krystalové mřížce olova plně rozpuštěny atomy cínu.

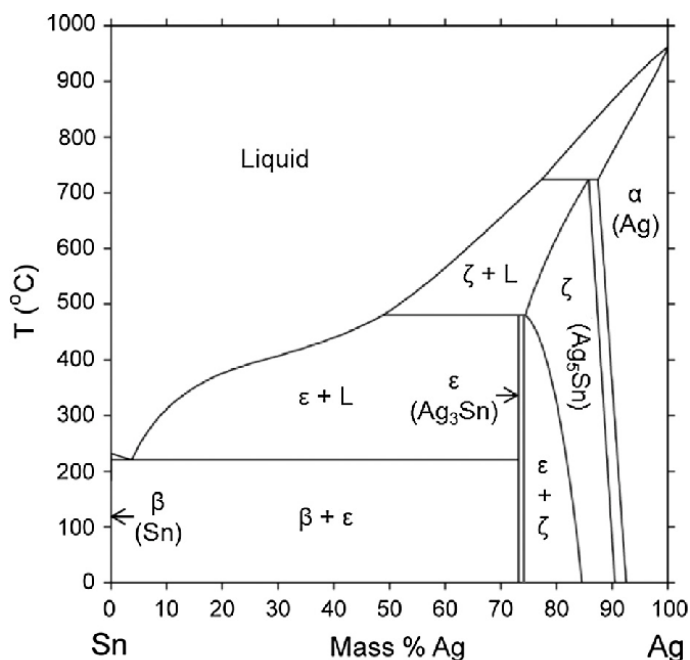


Obr. 2.3.1 – Fázový diagram cín – olovo [9]

Oblast $\alpha + \text{kapalina}$, resp. $\beta + \text{kapalina}$, je kapalná slitina cínu, ve kterém se tvoří pevné krystalky olova, resp. je kapalná slitina olova, ve kterém s tvoří pevné krystalky cínu. [9]

2.3.2 Fázový diagram cín – stříbro (SnAg)

Ve fázovém diagramu cín – stříbro (obr. 2.3.2) je křivka tání také ve tvaru písmene „V“

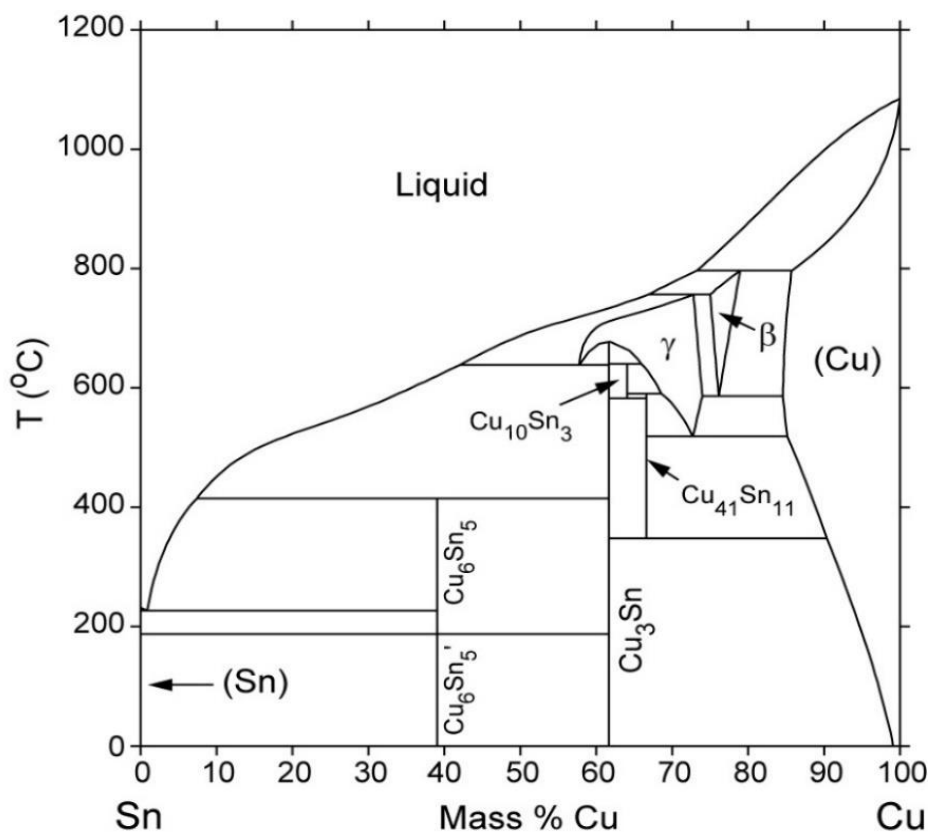


s nejnižším bodem přibližně ve 200 °C. Materiály z fázového diagramu, cín a stříbro, vytvářejí chemickou sloučeninu Ag_3Sn , ke které se při různých teplotách a různém procentním množství připojuje v pevném skupenství cín, stříbro, nebo společná tavenina.

Obr. 2.3.2 – Fázový diagram cín – stříbro [10]

2.3.3 Fázový diagram cín – měď (SnCu)

Podle fázového diagramu cín – měď (obr. 2.3.3) je zřejmé, že větší množství mědi ve slitině není pro měkké pájení vhodné, protože zásadně roste teplota tání slitiny. Měď se do pájky přidává v několika desetínách procent (0,3 % – 0,7 %), výjimečně 3 % a pájce zlepšuje zejména pevnost a chrání hroty ručních páječek. Při větším množství mědi v cínu (40 % +) se začínají tvořit intermetalická sloučenina Cu_6Sn_5 a od 60 % mědi se vytváří i intermetalická sloučenina Cu_3Sn (viz kapitola 2.2 *Intermetalická fáze*). Další intermetalické sloučeniny zmíněné v diagramu se běžně při měkkém pájení nevyskytují.

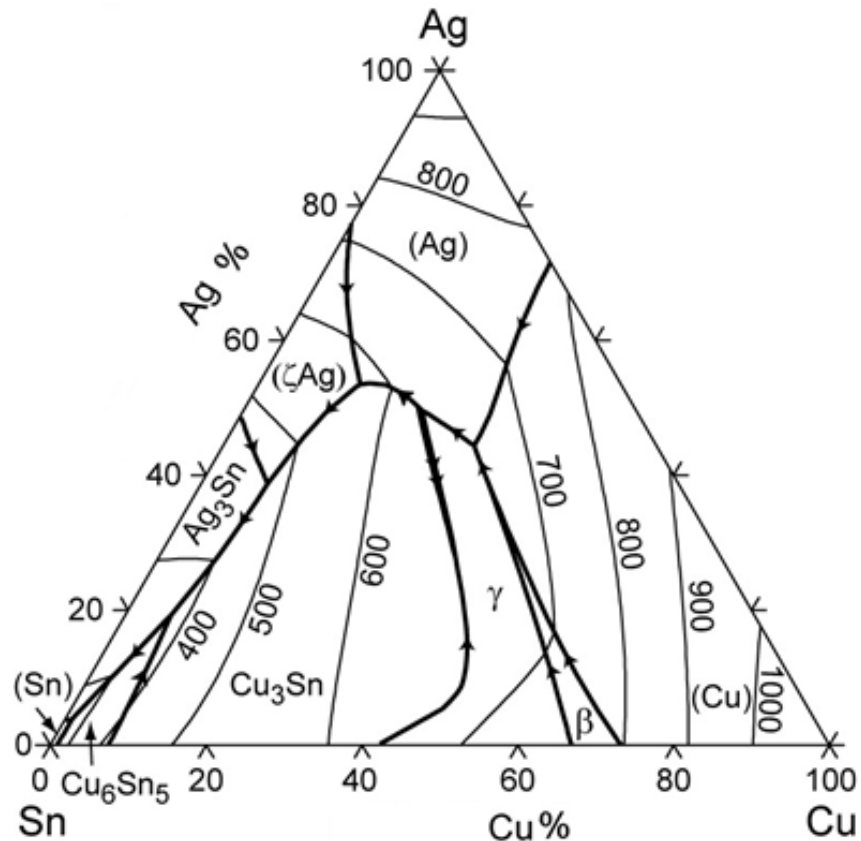


Obr. 2.3.3 – Fázový diagram cín – měď [11]

2.3.4 Fázový diagram cín – stříbro – měď (SnAgCu)

Ve fázovém diagramu cín – stříbro – měď (obr. 2.3.4) jsou zobrazeny obsahové poměry materiálů (cín, stříbro, měď), které tvoří slitiny a chemické sloučeniny. Čáry označené číslem udávají hodnoty teploty tání. Většinu oblasti tvoří slitiny s teplotou tání vyšší, než 400 °C.

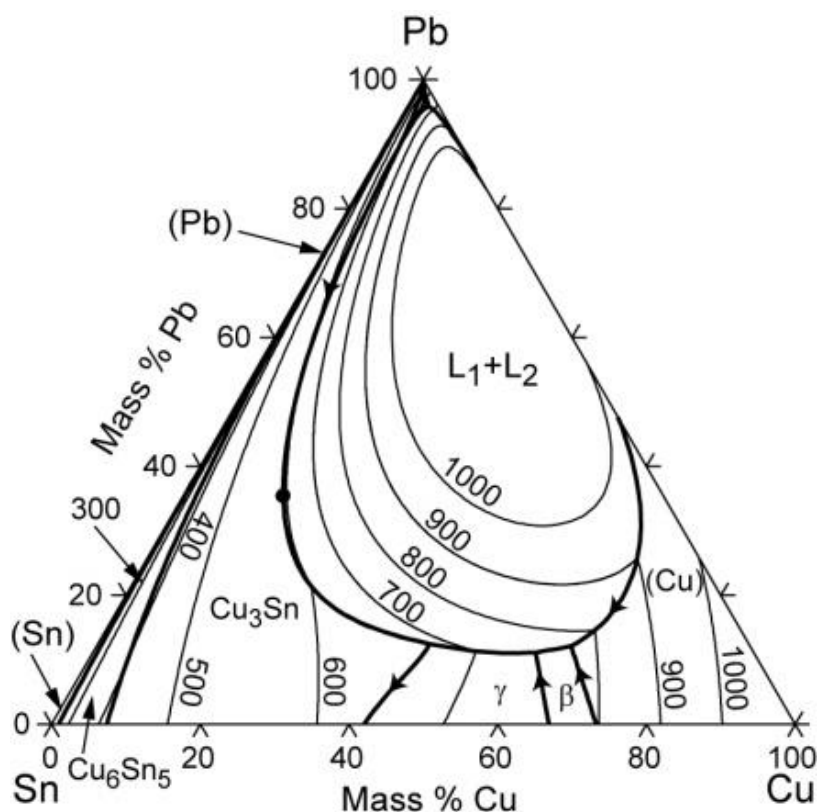
Z diagramu lze popsat pájecí slitinu cínu s malým množstvím stříbra a mědi. Oblast této pájky je v levém rohu, kde jsou poměry stříbra v jednotkách procent a mědi v desetínách procent. V těchto procentech pájka dosahuje teploty tání až na cca 220 °C. Z diagramu je zřejmé, že pájka může vytvořit i sloučeniny Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn . Toho je schopna pouze při vyšším procentuálním zastoupení, nebo při kontaktu s měděnou ploškou.



Obr. 2.3.4 – Fázový diagram cín – měď – stříbro [12]

2.3.5 Fázový diagram cín - olovo - měď (SnPbCu)

Tento fázový diagram obsahuje 3 prvky (obr. 2.3.5) a je zřejmé, jak procenta mědi ovlivňují teplotu tání eutektické slitiny SnPb. Už při několika procentech mědi zvyšuje teplotu na hodnoty, při kterých není možné provádět měkké pájení.



Obr. 2.3.5 – Fázový diagram cín – olovo – měď. [27]

2.4 Defekty pájení

V pájecím procesu mohou během přetavení vzniknout stavy, které znemožní fungování obvodu. Proto je nutné dodržovat podmínky pro vytvoření kvalitního pájeného spoje:

- správná pracovní teplota,
- dobrá smáčivost pájeného povrchu,
- správně zvolený druh pájky a dostatečné množství.

Při dodržení těchto podmínek je spoj lesklý, hladký a měl by být zřetelný ostrý úhel smáčení asi 15° - 20°. Při nedodržení těchto podmínek mohou vzniknout nedokonalosti a chyby, které ovlivňují funkčnost obvodu. Tyto chyby způsobují to, že spoj mění své vlastnosti a je elektricky namáhán více, než na co je dimenzován, vzniklé zkraty nebo nevodivé spoje způsobují větší tepelné zatěžování součástek i spojů. Mechanicky namáhané DPS jsou náchylnější k nevratnému mechanickému poškození. V technologii pájení jsou studie věnované minimalizaci chyb během pájení. Protože se použití bezolovnatých pájecích slitin výrazně rozšiřuje, problematice defektů se věnují studie po celém světě, neboť pájky bez olova jsou na chyby náchylnější a tak se objevují častěji.

2.4.1 Studený spoj

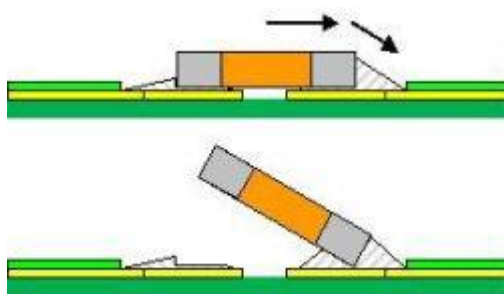
Mezi nejčastější chyby pájení patří tzv. studený spoj. Ten vznikne tehdy, je-li pájka správně přetavena, ale součástka s kontaktní ploškou nemá daný kontakt dostatečný a pájka nespojí tyto dvě části. Může nastat stav, kdy se pájka přetaví pouze na součástce, v tomto případě se na kontaktní plošku nedostalo tavidlo, nebo byla ploška hrubě znečištěna. Také může nastat stav, kdy se pájka přetaví pouze na plošce, zatímco je znečištěna součástka nebo nebyl vyvinut dostatečný kontakt s pájecí pastou.

2.4.2 Posunutí součástky

Jedním z dalších defektů pájení je posun součástky. Tento jev není obecně moc častý, pokud jsou dodrženy všechny podmínky pro usazení SMD součástek na DPS, jako je dobrý návrh desky plošného spoje, optimální množství pájecí pasty a další. Navíc pájecí pasta má při přetavení schopnost, při které se součástka může spíše vyrovnat, než aby vybočila mimo kontaktní plochu.

2.4.3 Tombstone effect

Dále jako jeden z častějších jevů je tzv. Tombstone effect (obr. 2.4.3). Jedná se o zvednutí součástky na jedné straně a tím přerušeni obvodu. Může vzniknout např. pokud je součástka



Obr. 2.4.3 – Příklad Tombstone effectu [26]

osazena nedokonalým způsobem (stejně jako při studeném spoji, s tím rozdílem, že pájka na druhé straně má větší sílu, než je tíha součástky), nebo pokud je na jedné straně více pájecí pasty a kvůli nečistotám nezafunguje lepivá vlastnost pasty na straně druhé. Tento efekt se též nazývá Efekt náhrobního kamene, Stonehenge atp.

2.4.4 Zkrat

Dalším častým defektem je zkratování vývodů, které vzniká zejména u vícevývodových součástek. Jedná se o nežádoucí spojení dvou, nebo více vývodů, které jsou velmi blízko u sebe. Při přetavení dochází k rozpuštění tavidla, které se rozteče po okolí a kvůli malým vzdálenostem pájka spojí více kontaktů. Tento problém nastává hlavně v případech, kdy je na plošky nanášeno nesprávné množství pájecí pasty. Nesprávné množství v tomto případě znamená to, že je pasta nanášena více, než je třeba. Naopak, pokud je pájky méně, vzniká výše zmíněný defekt – studený spoj.

3. Pájecí slitiny

Pájecí slitiny jsou v elektrotechnice používány pro vodivé spojení součástek na desce plošných spojů. Kromě elektrické vodivosti jsou u pájek důležité i další vlastnosti jako je mechanická pevnost, životnost spoje a další. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny např. druhem pájecí slitiny, nebo technologickým způsobem pájení.

3.1 Olovnaté pájecí slitiny

Nejpoužívanější olovnatými pájecími slitinami jsou ty s cínem a to proto, že jsou schopné se spojit skoro se všemi kovy. Nejrozšířenějšími z nich jsou dvousložkové, používají se ale i tříložkové. Slitina cín-olovo při váhovém poměru 63 % cínu (zbytek olovo a v minimálním množství příměsí) je pájka eutektická s teplotou tání 183 °C. [3] Používané elektrotechnické cíno-olověné pájky jsou vedeny v tab. 1, kde jsou uvedeny i přípustné hodnoty koncentrací příměsí. Dnes se olovnaté pájky používají zejména v situacích s vysokým nárokem na bezpečnost, v leteckém, automobilovém průmyslu atd. Pájka kromě olova a cínu obsahuje další kovy, tzv. příměsí, které jsou zpravidla nežádoucí a negativně ovlivňují dané vlastnosti slitiny. Zejména se jedná o příměsí mědi, kadmia, železa, hliníku, zinku, zlata, arsenu a niklu. Příměsí mohou pájku ovlivňovat i pozitivně a mezi ty patří bismut a stříbro:

- měď nad desetinu procenta v pájce po ztuhnutí způsobuje hrubozrnnost, tvrdost a křehkost a zhoršuje roztékavost pájky,
- kadmium nad setinu procenta v pájce způsobuje křehký a porézni pájený spoj, zrnková struktura,
- železo nad setinu procenta v pájce způsobuje, stejně jako kadmium, zrnkovou strukturu,
- hliník nad pět setin a zinek nad tisícinu procenta mají za následek špatnou roztékavost pájky a porézni pájený spoj,
- zlato dělá pájku zrnitou,
- arsen a nikl tvoří útvary podobné puchýřkům,
- bizmut snižuje teplotu tání pájky (používá se v bezolovnatých pájkách, viz Bezolovnaté pájecí slitiny),
- stříbro v pájce snižuje její schopnost rozpouštět jiné kovy, povrch pájeného spoje je matný a tmavý.

Tab. 1 – Používané pájky v el. technice s povolenými limity příměsí [24]

Složky nebo příměsí % váhové		Označení				
		Sn60Pb	Sn62PbAg	Sn63Pb	Sn5Pb	Sn10PbAg
Solid [°C]		183	179	183	308	268
Liquid [°C]		191	179	183	312	290
Sn	max	61,5	62,5	63,5	5,5	11
	min	59,5	61,5	62,5	4,5	9
Pb		zbytek	zbytek	zbytek	zbytek	zbytek
Sb	max	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2
	min	0,2	0,2	0,2		
Bi	max	0,25	0,25	0,25	0,25	0,03
Ag	max	0,015	2,25	0,015	0,015	2,4
	min		1,75			1,7
Cu	max	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Fe	max	0,02	0,02	0,02	0,02	
Zn	max	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Al	max	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
As	max	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
Cd	max	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
S	max	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
P	max	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
jiné	celkem	0,08	0,08	0,08	0,08	0,1

Při používání pájky dochází k jejímu znečištění, zejména při strojním pájení dochází k rozpouštění kovových povlaků vývodů součástek, kovy pak kontaminují pájku a ta mění své vlastnosti. Povrchové vrstvy dopomáhají k rychlému a správnému smáčení. Bývá nutné,

aby se povrchová úprava rozpustila, protože např. zlatý povlak by při nedostatečném rozpuštění způsobil intermetalické sloučeniny zlato - cín, které způsobí oslabenou mechanickou pevnost pájeného spoje a tím i jeho rychlou degradaci a rozpad. [24]

3.2 Bezolovnaté pájecí slitiny

Bezolovnaté pájky obsahují maximálně stopové množství olova. Použití těchto pájek se rozšířilo po roce 2002, kdy EU zařadilo olovo mezi nebezpečné látky. Bezolovnaté pájky se musí svými vlastnostmi podobat těm olovnatým a měly by splňovat určité podmínky. Jedna ze základních podmínek je teplota přetavení slitiny, která je u bezolovnatých pájek obecně vyšší. Výhodnější situací je použití eutektické slitiny, která má mj. výhodnější mechanické vlastnosti a teplotní rozdíl mezi solidem a liquidem není velký. Požadovanou vlastností je dobrá elektrická a tepelná vodivost, dlouhodobou funkčnost pájeného spoje zajišťuje nízká tepelná roztažnost pájecí slitiny. [19] [20]

Jako stavební materiál pro bezolovnatou pájecí slitinu nemohou být použity kovy s vysokým bodem tání, alkalické kovy a kadmium. Používané slitiny jsou typicky dvou až pětisložkové, vybrané pájky jsou i s některými vlastnostmi uvedené v tab. 2. [2] [19]

Tab. 2 – Přehled vybraných bezolovnatých pájecích slitin a jejich teploty tání [24]

Složení	Označení	Složky nebo příměsi % váhové						Teplota tavení
		Sn	Ag	Bi	Cu	Sb	Zn	[°C]
Sn - Ag	SnAg3,5	96,5	3,5	-	-	-	-	221
Sn - Bi	SnBi58	42	-	58	-	-	-	138,5
Sn - Cu	SnCu0,7	99,3	-	-	0,7	-	-	227
Sn - Zn	SnZn9	91	-	-	-	-	9	199
Sn - Ag - Bi	SnBi4,8Ag3,4	91,8	3,4	4,8	-	-	-	211
Sn - Ag - Cu	SAC305	96,5	3	-	0,5	-	-	220
Sn - Ag - Cu	SAC387	95,5	3,8	-	0,7	-	-	217-220
Sn - Ag - Sb - Cu	-	92,2	0,5	-	0,8	0,5	-	217
Sn-Ag-Sb-Cu-Zn	-	90,8	1	-	0,2	4	4	199-238
Sn-Ag-Sb-Cu-Zn	-	97,2	0,5	-	0,8	1	0,5	211-226

3.3 Forma pájky

Pájky se používají v mnoha odvětvích a v každém odvětví je vhodná jiná forma pájecí slitiny. Pro ruční pájení THD součástek a diagnostiku se nejčastěji používá pájka ve formě trubičky plněné tavidlem. V automatizovaných výrobcích a na osazování SMD součástek se používá forma pájecí pasty s obsahem tavidla. Roztavená pájka se používá v technologiích pájení vlnou, k selektivnímu pájení, k pájení ponorem apod. [5]

3.4 Tavidla

Tavidla pomáhají s roztavením, smáčením, odstraňují oxidy a nečistoty z pájených ploch.



Obr. 3.3 – Příklad kalafunového tavidla [4]

Nejrozšířenější typ je kalafunové tavidlo, které je tvořeno přírodní pryskyřicí. Samotná pryskyřice je málo účinná, proto se do ní přidávají organické kyseliny, tzv. aktivátory. Tavidla dělí podle úrovně aktivity a použitého aktivátoru na typy R, RMA, RA a RSA. Dále se tavidla dělí na organická a anorganická. Existují ještě tavidla typu SA, která jsou tvořena syntetickou pryskyřicí. Některé typy tavidel jsou agresivní

a korozivní vůči DPS a je nutné je oplachovat. Bezoplachová tavidla musí splňovat podmínky, podle kterých může být označena jako bezoplachová (no-clean). Bezoplachové tavidlo nesmí zanechávat korozivní ani lepivé zbytky a musí zajistit dokonalou pájitelnost. Dále musí být obsah pevných látek do 5 % oproti běžným tavidlům, kde je obsah pevných látek přibližně 40 %.

Dále budou probrána kalafunová tavidla (obr. 3.3), která jsou rozpustná v chlorových nebo fluorových hydrokarbonových rozpouštědlech, která jsou ale málo efektivní a čištění v těchto roztocích se nedoporučuje. Iontové halogenidové aktivátory by měly být rozpouštěny

pomocí směsí polárních a nepolárních rozpouštědel k dokonalému odstranění iontových zbytků. [29]

Tavidla z organických kyselin s podstatně vyšší aktivitou než pryskyřičná tavidla, jsou rozpustná ve vodě. Tyto tavidla nemusí obsahovat vodu, alkoholy ani glykoly a jsou rozpustná ve vodě, takže proces čištění je levný a snadný. Použitím těchto tavidel se dosahuje velmi kvalitního pájení, ale je nutné je brzy odstranit. [28]

Tavidlo s nejnižší aktivitou je typu R, které se skládá z čisté vodní bílé pryskyřice a je rozpustné pomocí alkoholového ředidla. Protože se obtížně čistí, používá se na dobře pájitelné plochy, jako jsou zlaté, měděné, cínové a cín-olověné povrchy. Zbytky tavidel jsou při pokojové teplotě netečné a nemusí být po pájení odstraněny.

Se střední aktivací je tavidlo typu RMA, které obsahuje malé množství vhodných organických směsí. Pro zvýšení aktivace se do tavidla přidává malé množství směsí aminohydrochloridů, polybazických karbonových kyselin a alkylových organických halogenidů. Normy většinou udávají, které chemické a elektrické testy musí tavidlo typu RMA splňovat, ale neudávají konkrétní směsi. Tyto tavidla jsou používána se snadno pájitelnými materiály, jako je měď, zlato a cín-olověné pájky. Obecně se tavidlo typu RMA bere jako netečné, odstranění je tedy volitelné, ale neodstranění může napáchat více škody než užítku. Proces koroze je totiž brzděn, dokud je aktivátor vázán s pryskyřicí.

Tavidlo se silnou aktivací je typu RA, obsahuje agresivnější příměsi než u tavidel RMA, pomáhá urychlit smáčivost u snadno pájitelných materiálů a tím redukuje množství defektů pájecího procesu. Federální norma QQ-S-571, vojenská norma MIL-F-14256 a česká norma ČSN EN 29454 opět neuvádějí, jaké příměsi mohou být použity, jen jaké testy tavidlo musí splňovat. U tohoto typu je kompletní odstranění zbytků kvůli zvýšené agresivitě nutné. Neodstraněné tavidlo na DPS podporuje dlouhodobou korozi kovových částí, zvláště ve vlhkém prostředí.

Tavidlo se superaktivitou je typu RSA. Neodstranění tavidla má za následek silnou korozi kovových částí DPS, odstranění pravděpodobnost koroze sníží.

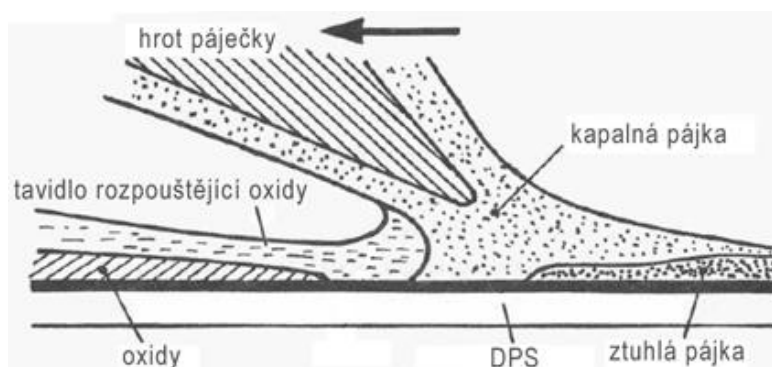
Syntetická aktivovaná tavidla SA jsou založena na mono- a di- isooktylu fosfátových směsí kombinovaných s různými příměsemi ke zlepšení aktivity a usnadnění odstraňování zbytků. Používají se pro pájení vlnou a v pájecích pastách, protože jejich složení může být přesně kontrolováno. [19] [20] [21]

4. Technologie pájení

Pájení je v elektrotechnice způsob, jak docílit kvalitního propojení součástek na desce plošných spojů. K pájení se využívá kov s nižší teplotou tání.

4.1 Ruční pájení

Po dlouhou dobu se používalo hlavně ruční pájení. V současné době se ruční pájení používá zejména v diagnostických a opravárenských centrech, nebo v malovýrobách pájením běžných součástek THD. Tato technika využívá páječky s měděnými hroty přehřáté většinou na 300–330 °C při použití olovnaté pájecí slitiny SnPbCu. Nejprve se prohřívají spojované materiály a pájka se poté přidává a přetavuje. Pájky pro ruční pájení jsou vyráběny většinou jako trubičky s tavidlem uvnitř, které pomáhá se smáčivostí a očištění oxidů z pájených materiálů, desky a součástky. Mezi strojní rozšířené způsoby pájení patří pájení vlnou, pájení ponorem, pájení vlečením, pájení ultrazvukem a pájení přetavením. Každá z těchto technologických variant má své výhody i nevýhody a dále budou podrobněji představeny. [6] [19]



Obr. 7 – Tvorba ručně pájeného spoje [7]

4.2 Pájení vlnou

Pájení vlnou je jedním ze způsobů hromadného pájení THD součástek. Deska plošných spojů, osazena součástkami technologie THT, které mají vývody skrz desku a pájí se ze spodní strany, je unášena po dopravníku, nejprve se na spodní stranu desky nanáší tavidlo, poté je deska

nesena zónou předeřevu, kde je DPS i součástky předeřřáty na teplotu blízkou teplotě tání pájecí slitiny, rozpouštědlo v tavidlu se z části odpařř. Vlna vypadá jako voda protékající přes jez a přes její vrchol je dopravníkem protažena DPS. Existuje několik druhů vlny, dutá, turbulentní a laminární vlna. [6] [19]

4.3 Pájení ultrazvukem

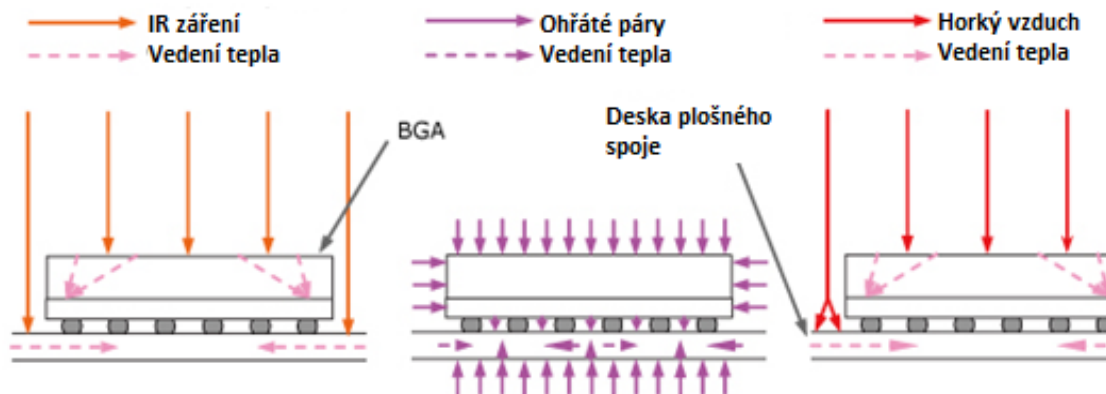
Speciální metodou pájení je pájení ultrazvukem, která využívá speciální pájecí slitiny a ultrasonické pájky. Velkou výhodou tohoto druhu je možnost pájet na normálně nepřilnavé povrchy. Metoda se používá například na kontaktování. [6] [19]

4.4 Pájení přetavením

Pájení přetavením je další z metod hromadného, ručního i selektivního pájení. Využívá se zejména v automatizovaných výroách, kde se stroje starají o téměř většinu výroby. DPS je strojně očištěna, je na ni nanesena pájecí pasta, je osazena SMD součástkami, poté přetavena v peci a nakonec i zkontrolována na chyby a různé defekty. Pasta se na DPS nanáší sítotiskem přes šablonu, nebo pomocí dávkovače neboli dispenseru. Šablony jsou vyráběny jako fólie z mědi, mosazi nebo nerezové ocele a mají vzor děr pro konkrétní DPS, proto je z ekonomických důvodů tisk přes šablony využíván hlavně v sériových výroách. Na DPS je přiložena šablona a přejetím stěrky se nanese definované a tím i požadované množství pájecí pasty. Nanášení pasty dávkovačem se používá v prototypové a malosériové výrobě, kde je výroba šablon zbytečně ekonomicky náročná. Dávkování je přesné a v požadovaném množství. Pro pájení přetavením se používá několik metod rozdělených podle způsobu ohřevu:

- pájení zářením,
- pájení kondenzační (v párách),
- pájení nuceným prouděním horkého plynu,
- pájení ohřevem horkým pásem (nebo deskou),
- pájení laserem.

Výběr metody závisí na typu použitých součástkách, na typu a rozměrech pouzder, na hustotě osazení, na typu DPS atd. [6] [19]



Obr. 4.4 – Přenos tepla [6]

Přetavení infračerveným zářením je založeno na absorpci vlnění vyzářeného z topných těles. Tyto zdroje jsou např. topné spirály zalisované do keramického materiálu, nebo wolframové žárovky s halogenovým cyklem. Kvalita ohřevu je závislá také na absorpci okolním plynným prostředím a rozdílnou absorpcí pouzder součástek. Velkou výhodou je nízká cena provozu a kratší časy pájení. Součástky s větším pouzdem ale vytvářejí stíny a mohou tak bránit dostatečnému prohřátí, ovlivňují také teplotu na vývodech součástky, které mohou být nepřetavené nebo přehřáté. [6]

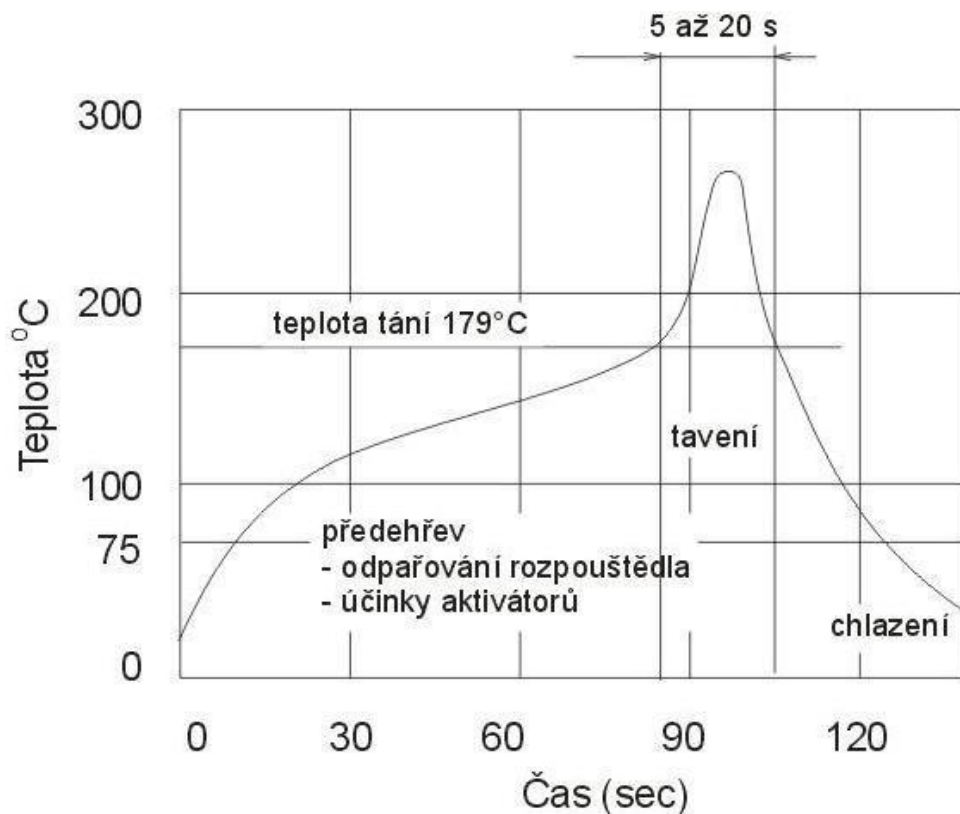
Pájení v parní lázni má výhodu v tom, že přetavení probíhá v ochranné atmosféře, páry neobsahují kyslík, tudíž spoje pak neoxidují. Speciální pájecí kapalina (označována jako Galden), se přivede k varu a začne se odpařovat, teplota páry je závislá na typu použité kapaliny. DPS nelze do páry vložit chladnou, je nutné ji nejdříve přehřát například pomocí infračerveného záření, nebo ji do par pouštět pozvolna, tím se zabrání teplotnímu šoku, který by desku nebo součástky mohl poškodit. Lze také desku nejdříve vložit do pece a až pak pájecí kapalinu začít ohřívat, je to ale časově náročnější postup. Princip metody pájení v parní lázni je založen na kondenzaci na chladnějších místech desky, která se může ohřát až na teplotu nasycené páry. Na obr. 4.4 je vidět, že rozložení teploty je na desce rovnoměrné a není zde shadow effect, součástky nebrání vedení tepla. Kapalina musí být samozřejmě neagresivní vůči součástkám a DPS, aby nedošlo k jakémukoliv poškození. Pájecí kapaliny jsou poměrně drahé proto byly vyvinuty technologické systémy, kde dochází ke ztrátám pouze v řádu desítek mg na vsazku. [6]

Pájení přetavením v průběžné peci horkým plynem využívá většinou zóny přehřevu a zóny přetavení. Ohřívacím plynem v zónách přehřevu bývá nejčastěji vzduch, v zóně přetavení vzduch nebo dusík, ten se používá jako ochranná atmosféra. Proudění plynu zajišťují trysky umístěné v podélných a příčných pásmech. V každé zóně je nastavena určitá teplota, v přehřívacích je teplota nižší, než teplota přetavení pájky a slouží k prohřátí DPS. Rozložení

teploty na desce je rovnoměrnější než u IR zářiče, nezáleží tolik na velikosti pouzdra součástek, ale přetavení trvá déle. Hrozí ale posunutí nebo vychýlení součástek vlivem proudu plynu. [6] [19]

4.5 Teplotní profil

Teplotní profil bývá předepsán výrobcem pájecí pasty pro kvalitní přetavení pájecí pasty. Pro zachycení teplotního profilu se používají profilometry s teplotními čidly, která jsou pak připojena k požadovaným místům. Profilometr zaznamenává závislost teplota/čas, která se ukládá do počítače. Následně pak lze vyhodnotit zaznamenané hodnoty např. v řádu desetin sekund, program poskytuje i okamžitý grafický pohled na zaznamenanou závislost.

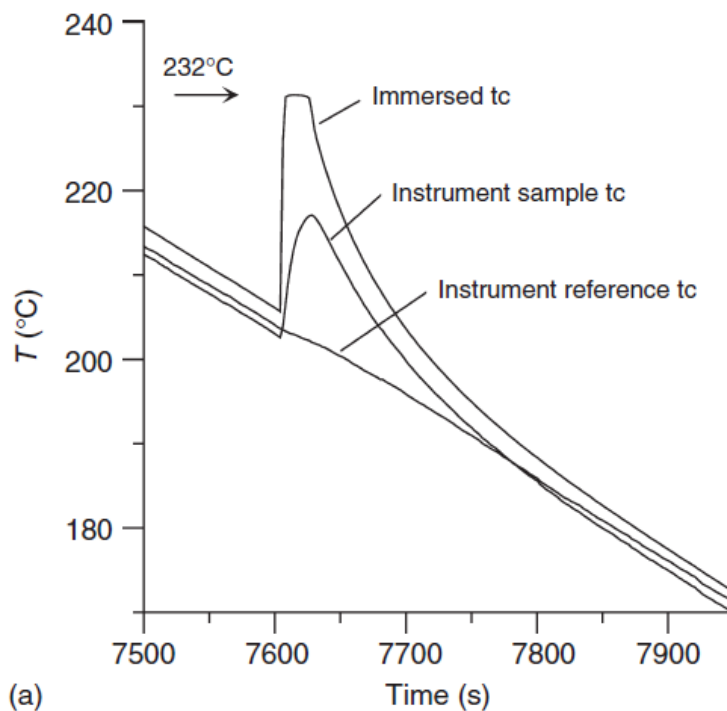


Obr. 4.5 – Typický teplotní profil [8]

Typický teplotní profil je na obrázku (Obr. 4.5), je zde patrné, že přetavení předchází předehřátí na určitou teplotu a po určitý čas, aby se z pájky vypařily přísady (tavidla, aktivátory), roztavená pájka je zahřívána na teplotu o desítky stupňů vyšší kvůli dostatečnému prohřátí. Následuje chladnutí, které může být též teplotně řízeno.

4.5.1 Latentní teplo

Při přeměně z tuhé na kapalnou formu dochází k dekalescenci a do pájky se akumuluje tepelná energie potřebná k fázové přeměně. Dekalescence je pokles nebo zmírnění nárůstu teploty, který nastává při absorpci tepla materiálem během fázové přeměny. K fázové přeměně z kapalně na tuhou formu dochází při chladnutí. Při přeměně L → S (Liquid to Solid) dochází k rekalescenci. Rekalescence je nárůst teploty při chladnutí, která nastane při změně skupenství. Probíhá zde tedy vratný entropický děj. Z pájky se uvolňuje dříve nahromaděné teplo, které způsobí chvilkové zpomalení chladnutí, nebo dokonce nárůst teploty. Po ukončení uvolnění tohoto tepla pokračuje chladnutí. Tuto energii nazýváme **latentní teplo**. Velikost této energie, nárůst i doba uvolňování je závislá na množství a typu pájecí slitiny.

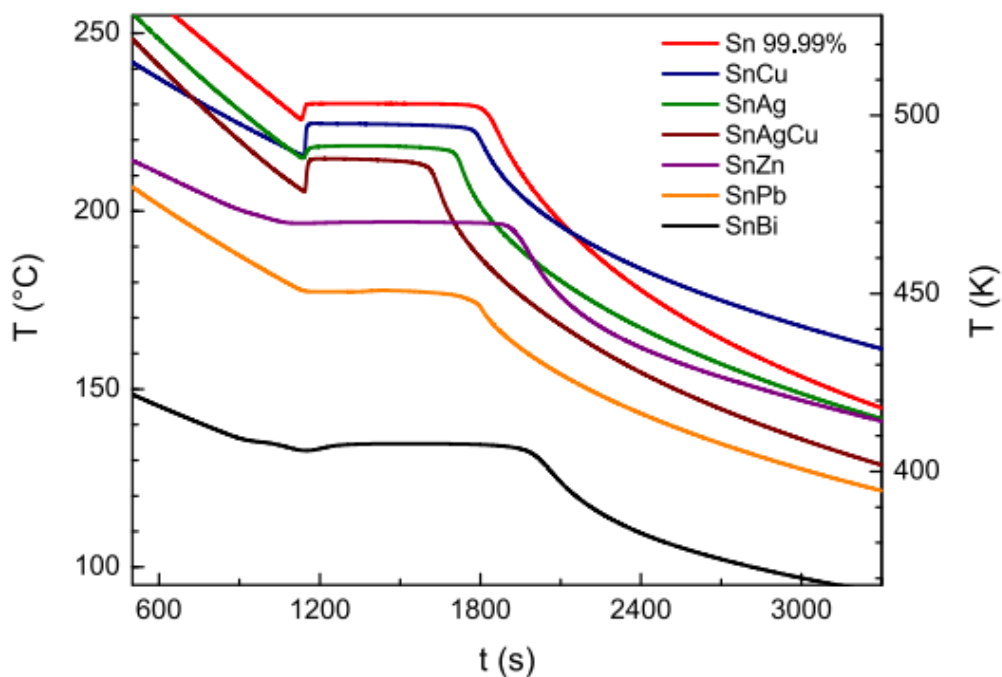


Obr. 4.5.1a – Průběh chladnutí čistého cínu během transformace L → S [15]

V publikaci *Methods for Phase Diagram Determination* [15] je uveden příklad chladnutí vzorku čistého cínu o hmotnosti 163,2 mg (obr. 4.5.1a). Během ochlazování (5 K/min) zde dochází k podchlazení cínu. Při použití termočlánku ponořeného přímo v cínu lze určit teplotu, kdy dochází k tzv. nukleaci. Nukleace je stav, při kterém se v roztaveném materiálu začínají tvořit krystaly. K nukleaci dochází při podchlazení na 206 °C, poté dojde k rekalescenci a teplota cínu naroste o 26 °C na teplotu přetavení, 232 °C. Teplota vzorku neklesne, dokud nedojde ke kompletnímu ztuhnutí. Při použití přístrojového termočlánku se vzorek ochladí na 203 °C

a teplota naroste na 217 °C. Na stejném obrázku je zobrazen též referenční průběh termočlánku. [15]

Pokud se zaměříme na slitiny, v publikaci Fluidity of Sn-based eutectic solder alloys [30] jsou zmíněny mj. pájecí slitiny Sn37Pb a Sn0,7Cu a jejich teplotní profil v oblasti chladnutí a transformace z kapalné do tuhé formy. Z obr. 4.5.1b je patrné, že při přeměně L -> S u slitiny Sn37Pb nedochází k strmému nárůstu teploty, jak je uvedeno pro čistý cín. Naopak u slitiny Sn0,7Cu dochází k zhruba dvojnásobnému nárůstu teploty oproti cínu. Teplotní profily byly pořízeny při použití vzorků o hmotnosti mezi 50 a 80 g. [30]



Obr. 4.5.1b – Průběhy chladnutí slitin během transformace L -> S [30]

5. Šíření tepla

Šíření tepla popisuje způsob přenosu energie mezi tělesy, přičemž přenos probíhá vždy od tělesa s větší energií k tělesu s menší energií. Lze to interpretovat jako přenos energie z teplejšího tělesa ke studenějšímu. V podstatě se jedná o termodynamický zákon. Přenos tepla je možný třemi způsoby, kondukcí, konvekcí a radiací. Tyto způsoby budou popsány v následujících podkapitolách.

5.1 Přenos tepla vedením (kondukcí)

Přenos tepla kondukcí neboli též vedením je jedním ze způsobů přenosu tepla v pevných tělesech. Teplo lze šířit uvnitř tělesa, nebo přes kontaktní plochu mezi dvěma a více tělesy. Teplo se ve speciálních případech šíří kondukcí i v kapalných nebo plynných stavech, kde se o šíření tepla stará zejména konvenční vedení. Přenos tepla vedením zajišťuje kmitání částic, které svou energii předávají částicím s nižší energií. [25]

Vedení tepla můžeme sledovat podle stavu tepla:

- **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 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] je součinitel teplotního toku – charakterizuje tepelnou propustnost látky – tzv. měrná tepelná vodivost, q [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$] je hustota tepelného toku a $\text{grad}\vartheta$ [K] je gradient teploty neboli teplotní růst (se záporným znaménkem se jedná o spád):

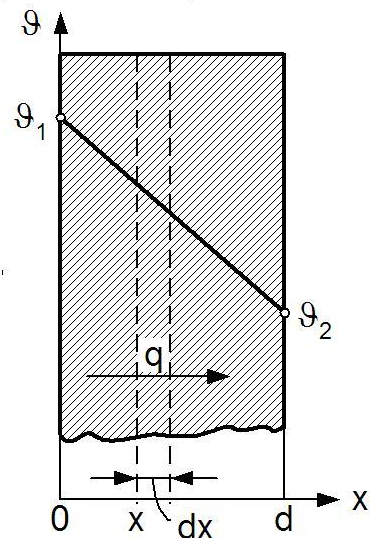
$$\lambda = -\frac{q}{\text{grad}\vartheta} \quad /1/$$

Tuhá tělesa mají tepelnou vodivost, která udává množství tepla Q [J] proteklého jednotkovým průřezem S [m^2] za jednotku času t [s] při teplotním spádu 1 K na jednotku délky. Po dosazení do /1/ je dáno vztahem:

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

Základním příkladem vedení tepla kondukcí je jednoduchá nekonečně velká rovinná stěna o tloušťce d . Teplo se šíří pouze ve směru osy x . Podle teplot na jedné straně stěny ϑ_1 a na straně druhé ϑ_2 se určí směr šíření tepla, od vyšší teploty k nižší. [25]

Tepelný odpor R_T definovaný vztahem /3/ je míra odporu tělesa proti šíření tepla přes danou tloušťku materiálu [17]. Teplotní odpor lze definovat přímo úměrně tloušťce materiálu d a nepřímo úměrně teplotnímu toku λ a ploše materiálu, kterou se teplo šíří. [25]



Obr. 5.1 – Jednoduchá rovinná stěna [25]

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

Celkový tepelný odpor tělesa R_{CT} složeného z více materiálů je součet tepelných odporů jednotlivých materiálů R_{T1} , R_{T2} a popřípadě i přechodu mezi materiály R_{T12} /4/. [25]

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

Teplená vodivost /5/ G_T :

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

5.2 Přenos tepla prouděním (konvekci)

V kapalinách a plynech se teplo šíří konvekci neboli prouděním. Přenos tepla je založen na principu pohybujících se částicích v médiu. Teplo je schopno se šířit i na pevné těleso, pokud je s kapalinou nebo plynem v přímém kontaktu. Jeden z typických příkladů proudění tepla je v zemské atmosféře, kde teplejší vrstvy plynu nebo kapaliny stoupají vzhůru, protože teplejší vrstvy mají nižší hustotu a díky gravitační síle jsou chladnějšími vrstvami vytlačovány. Pokud je kapalina nebo plyn v nádobě, lze je ohřívat ze spodní strany a díky jejím vlastnostem a proudění lze ohřát médium v celé nádobě. Obdobným způsobem lze ochlazovat médium ze shora. V praxi se přenosu tepla prouděním využívá např. v ústředním vodním topení, kde se do spodní části přivádí horká voda a chladnější voda se odvádí z horní části. Volné proudění je proudění způsobené rozdílem hustoty částí kapaliny nebo plynu. Nucené proudění je proudění způsobené vnějšími silami jako jsou atmosférické vlivy, ventilátory nebo čerpadla. Přenos tepla nuceným prouděním závisí na fyzikálních i chemických vlastnostech kapalin a plynů, na rychlosti a směru proudění, na jejich tepelné vodivosti atd. [25]

V přírodě nelze volné a nucené proudění od sebe zcela oddělit, lze pouze vymezit jejich vliv na danou aplikaci, tzn. např. při větší rychlosti proudění má menší vliv proudění nucené, a naopak při malých rychlostech proudění je významný vliv na straně volného proudění. Volné a nucené proudění lze osamostatnit pouze v laboratorních podmínkách. [17]

Množství tepla popisuje Newtonův zákon /6/:

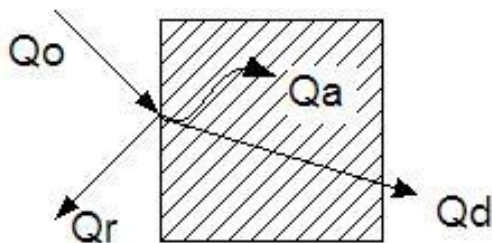
$$Q = \alpha S \tau \Delta \vartheta \quad /6/$$

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

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

5.3 Přenos tepla sáláním (radiací)

Každé těleso vyzařuje energii, je to vlastnost přírodou daná a vychází z elektromagnetického vlnění z jednoho tělesa k druhému. Přenos záření je možný přes prostředí, kterým toto záření může procházet. Na rozdíl od konvekčního a kondukčního přenosu, radiací se teplo může přenášet i ve vakuu. Vyzářená energie z jednoho tělesa Q_0 na druhé těleso se rozdělí na pohlcenou energii Q_a , na odraženou energii Q_r a na energii Q_d , která tělesem prochází. Odražená energie pokračuje k dalšímu tělesu, kde je opět část pohlcena, odražena a prostoupena (Obr. 5.3). Velikost vyzářené energie závisí na několika faktorech



Obr. 5.3 – Šíření tepla sáláním [25]

a jedním z nich je množství energie ve formě teploty tělesa, to je popsáno Planckovým vyzařovacím zákonem. Další faktor je stav a barva povrchu, zatímco stříbrné a lesklé povrchy vyzařují nejmenší energii, tak černé matné povrchy vyzařují energii největší. Stav a barva povrchu má stejný vliv i na pohlcování nebo odražení energie. Tzv. absolutně černé těleso pohlcuje veškerou energii, která

na povrch dopadne. Třetí faktor je obsah plochy. Vyzářená energie je přímo úměrná obsahu povrchu vyzařovaného tělesa. [25]

Množství energie Q [J], které těleso vyzáří za určitou časovou jednotku, se nazývá sálavostí tělesa a značí se E [$J \cdot m^{-2}$]. Platí tedy:

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

Množství energie Q_0 dopadající na těleso je rozděleno na energii pohlcenou Q_a , odraženou Q_r a energii, která tělesem projde Q_d . Platí tedy:

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

Po úpravě rovnice /9/ vydělením 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] [25]

Se sáláním souvisí i některé zákony termodynamiky, zejména:

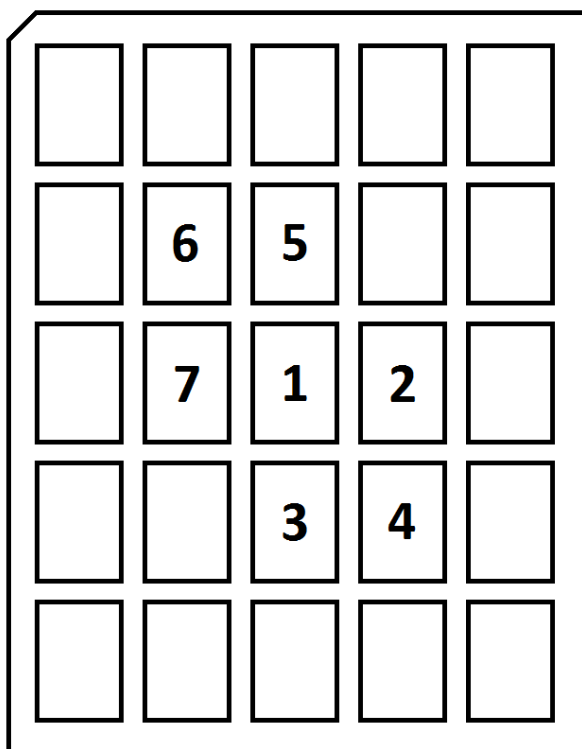
- Planckův vyzařovací zákon
- Wienův posunovací zákon
- Stefan – Boltzmannův zákon

6. Měření latentního tepla

Úkolem je změřit teplotní profily sedmi plošek, které buď neobsahují nebo obsahují pájecí pastu. Pro měření byla vyrobena modelová DPS s 25 ploškami, pět řad po pěti členech. Sledované plošky se nachází uvnitř pomyslného obdélníku. K měření byla zvolena průběžná pec MISTRAL 260, která k ohřevu využívá 3 zóny. První dvě zóny jsou zóny předehřevu a třetí je zóna přetavení. Tato pec využívá konvenčního nuceného ohřevu. Pro měření byly vybrány pájecí slitiny SnPb37 a SAC387, které byly již dříve zkoumány a je nutné je podrobit dalšímu měření.

6.1 Příprava měření

Jak už bylo výše zmíněno, měření probíhalo na modelové desce o 25 ploškách (obr. 6.1.1). Na obrázku jsou označeny číslicemi plošky, na kterých probíhalo měření. Na DPS



Obr. 6.1.1 - Modelová DPS s čidly

musely být vyfrézovány díry ze spodní strany, a to až na měděnou plošku. Do děr pak byla připevněna teplotní čidla. Kontakt teplotního čidla s měděnou ploškou byl zajištěn přitlačení a zalitím teplovodivým silikonem značky Den Braven. Z devíti „aktivních“ plošek jich bylo měřeno 7, přičemž teplotní čidla byla rozmístěna tak, aby byly pokryty směry šíření tepla z plošky č. 1, která je umístěna uprostřed. Krajní plošky zůstaly volné, aby byla zajištěna homogenita devíti vnitřních plošek.

Teplotní čidla měří po desetinách stupňů a připojují se k zařízení snímající teplotní profily KIC EXPLORER se sedmi kanály (obr. 6.1.2). Zařízení je schopno zaznamenávat data online jako transmitter, tzn. pokud je připojeno k počítači, nebo jako datalogger v režimu offline. V druhém případě se data ukládají v zařízení. Data je poté možné přenést a vyvolat v počítači. Program KIC 2000 převádí naměřená data do grafické podoby. Zařízení KIC EXPLORER je vyrobeno tak, aby odolalo vyšším teplotám a pokud je během záznamu v peci, ukládá se do termoizolačního pouzdra.



Obr. 6.1.2 – KIC EXPLORER – snímač teplotního profilu

Průběžná přetavovací pec MISTRAL 260 (obr. 6.1.3) využívá 3 zóny, které byly v případě olovnaté pájky SnPb37 nastaveny na 155 °C, 185 °C a 250 °C. Bylo nutné nastavit teploty jednotlivých zón tak, aby k přetavení došlo až ve třetí zóně (v zóně přetavení). V případě bezolovnaté pájecí pasty SAC387 byly zóny nastaveny na 165 °C, 205 °C a 265 °C, protože tato



Obr. 6.1.3 – Průběžná přetavovací pec MISTRAL 260

pájka má teplotu tání vyšší o přibližně 35 °C, než prve zmíněná olovnatá. Pec MISTRAL 260 využívá proudění vzduchu, který je ohříván infračervenými zářiči a po peci je v jednotlivých zónách rozváděn pomocí ventilátorů. Pec disponuje digitálním dotykovým displejem, kde je možné nastavovat teploty zón i rychlost automatického dopravníku, která byla nastavena na minimální hodnotu 15 cm/min. Součástí pece je také zóna aktivního chlazení využívající

ventilátory. Pro naše měření bylo v zóně chlazení zamezeno aktivnímu chlazení, které by ovlivňovalo měření na testovaném vzorku DPS.

Na jednotlivé plošky modelové DPS byla nanášena pájecí pasta o hmotnosti 30 mg. Tabulka 6.1 udává všechny použité varianty nanášení pájecích past na jednotlivé plošky DPS.

Číslo pájených plošek	Pájecí slitina	
	Sn37Pb	SAC387
referenční	+	+
1	+	+
35	+	+
135	+	+
12357	+	+
všech 9	+	+

Ke každé variantě bylo naměřeno minimálně 5 teplotních profilů (mimo referenční) a maximálně 9 profilů. Z tabulky je zřejmé, že nejvíce sledovanou ploškou je ploška 1, která se nachází uprostřed modelové desky plošných spojů.

Pájecí pasta byla odvážena na laboratorních vahách s přesností na desetinu miligramu. Před každým měřením byla váha zkalibrována, protože při takto malých

hmotnostech má na měření vliv jakákoliv změna tlaku, změna teploty okolí i okolní vibrace.

6.2 Změřené teplotní profily

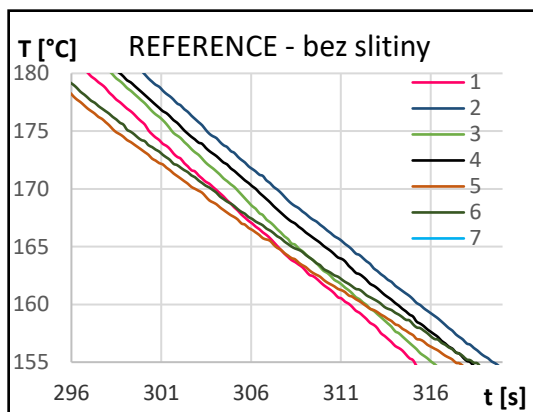
Teplotní profily mají časový rozsah cca 400 s a teplotní rozsah 0 – 250 °C. V následujících dvou podkapitolách budou komentovány části teplotních profilů v časovém rozmezí 250 s – 350 s a teplotním intervalu 150 °C – 250 °C. Podkapitoly jsou rozčleněny podle typu pájecí slitiny. Vybrané změřené teplotní profily jsou v příloze.

6.2.1 Teplotní profily slitiny Sn37Pb

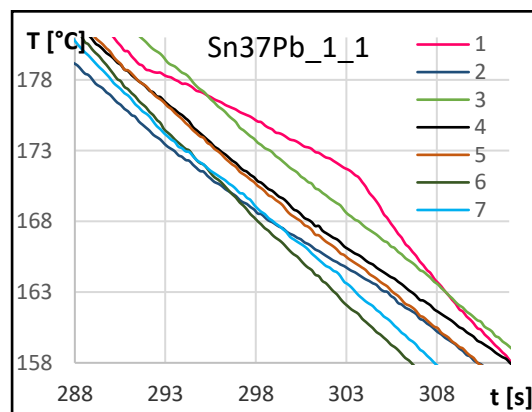
V této podkapitole jsou popsány průběhy jednotlivých variant destiček, kde každá varianta disponuje různým počtem plošek s pájecí slitinou (viz Tab. 6.1). Grafy jsou značeny jako **NAZEV_X_Y**, kde **NAZEV** označuje druh slitiny, **X** označuje plošky modelové DPS, kde je nanášena pájka a **Y** označuje číslo měření průběhu toho samého vzorku.

6.2.1.1 TP na plošce 1

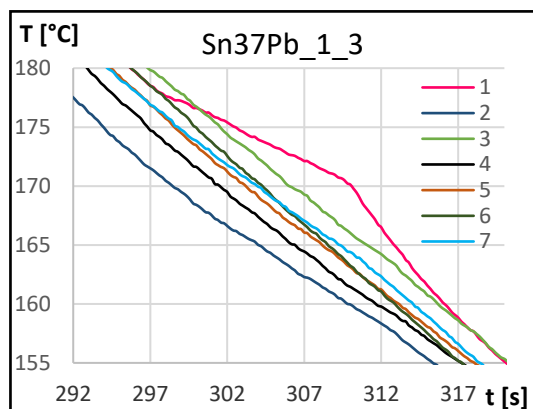
Na obr. 6.2.1.1a je výřez grafu Sn37Pb_1_1 je patrné, že na plošce 1 pájka v bodě nukleace při 178,5 °C začne uvolňovat latentní teplo. Oproti referenčnímu průběhu na obr. 6.2.1, který chladne rychlostí cca 1,25 K/s, po dobu uvolnění této skryté energie, která činí 12 s, se rychlost chlazení zmenší na přibližně 0,6 K/s, poté se průběh teploty vrátí k referenční hodnotě. Jsou zde uvedeny tři z pěti detailů teplotních profilů, ostatní jsou uvedeny v příloze jako celé teplotní profily. Jak je uvedeno v kapitole 4.5.1 *Latentní teplo*, při transformaci z kapalné do tuhé formy v teplotním profilu pájecí slitiny Sn37Pb nedochází k nárůstu teploty, avšak v obr. 6.2.1.1c v průběhu 4. přetavení Sn37Pb_1_4 je patrný nárůst teploty o přibližně půl kelvinu. Protože se při přetavení tvoří na povrchu plošky intermetalická sloučenina, kterou tvoří difúze cínu do měděné plošky, mění tím složení pájecí slitiny. Při opakovaném přetavení intermetalická sloučenina roste a cín je z pájky opakovaně odsáván a slitina se stává bohatší na olovo.



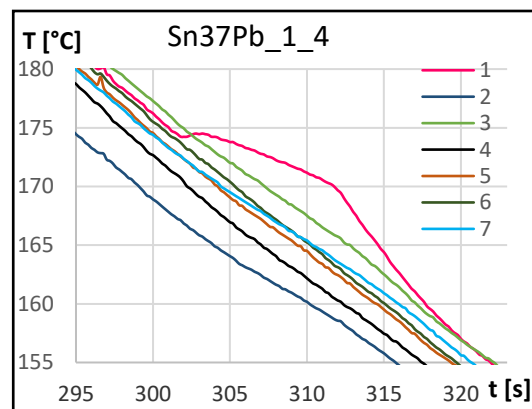
Obr. 6.2.1 – referenční průběh – bez slitiny



Obr. 6.2.1.1a – průběh 1. přetavení plošky 1



Obr. 6.2.1.1b – průběh 3. přetavení plošky 1

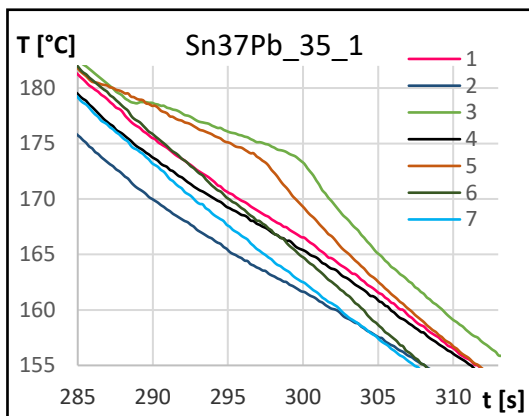


Obr. 6.2.1.1c – průběh 4. přetavení plošky 1

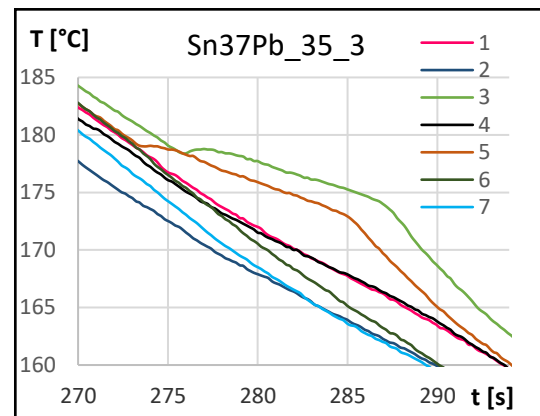
6.2.1.2 TP na ploškách 35

Obr. 6.2.1.2a obsahuje graf Sn37Pb_35_1, který popisuje průběh chladnutí destičky s pájkou na ploškách 3 a 5 (viz Příprava měření). Pájka na plošce 3 v bodě nukleace (178 °C) začíná měnit skupenství a tím zpomalí proces chladnutí velmi podobně, jako u plošky 1 z předchozí kapitoly. U plošky 5 začíná nukleace při 180 °C a chová se podobně jako ploška 3. Lze si všimnout, že na ploškách 1, 2 a 4 je patrné zpomalení chladnutí teploty po dobu uvolňování tepla z plošek 3 a 5.

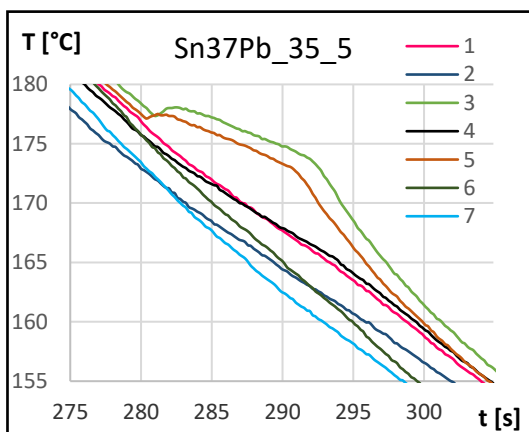
Z grafů na obrázcích je zřejmé, že se pájka po vícenásobném přetavení začíná chovat jinak než při prvním přetavení. V průbězích je patrný nárůst teplot až o 2 °C. Vliv na plošky 1,2 a 4 se opět projevuje sníženou rychlostí chladnutí.



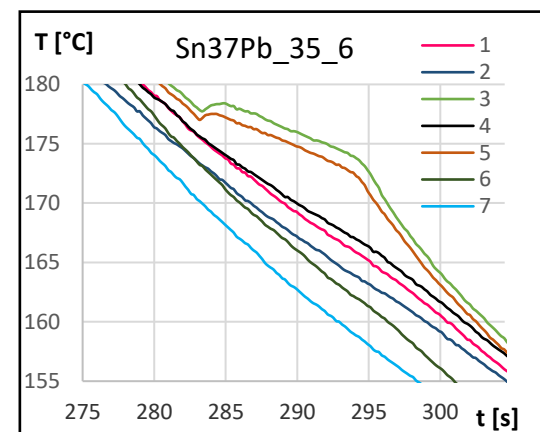
Obr. 6.2.1.2a – průběh 1. přetavení plošek 3 a 5



Obr. 6.2.1.2b – průběh 3. přetavení plošek 3 a 5

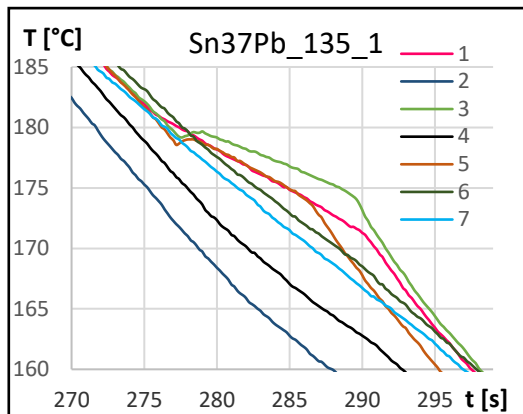


Obr. 6.2.1.2c – průběh 5. přetavení plošek 3 a 5

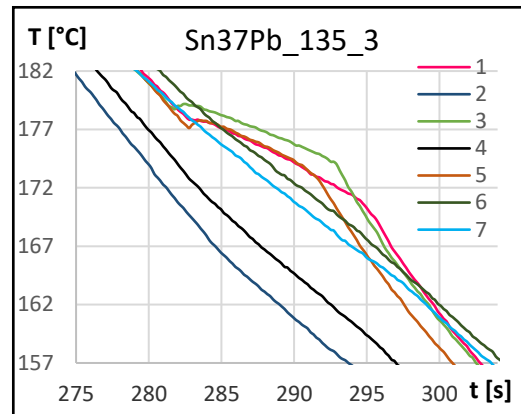


Obr. 6.2.1.2d – průběh 6. přetavení plošek 3 a 5

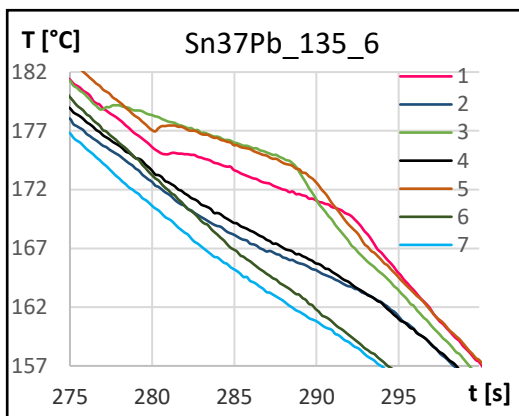
6.2.1.3 TP na ploškách 135



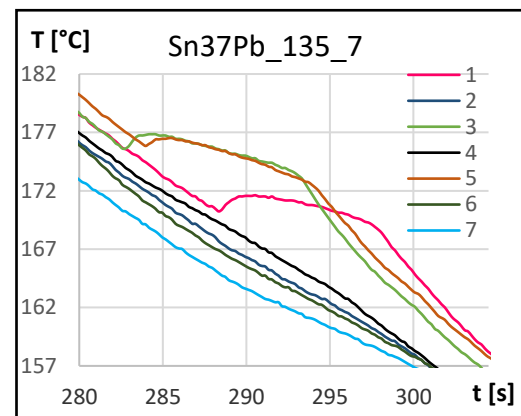
Obr. 6.2.1.3a – průběh 1. přetavení plošek 1, 3 a 5



Obr. 6.2.1.3b – průběh 3. přetavení plošek 1, 3 a 5



Obr. 6.2.1.3c – průběh 6. přetavení plošek 1, 3 a 5



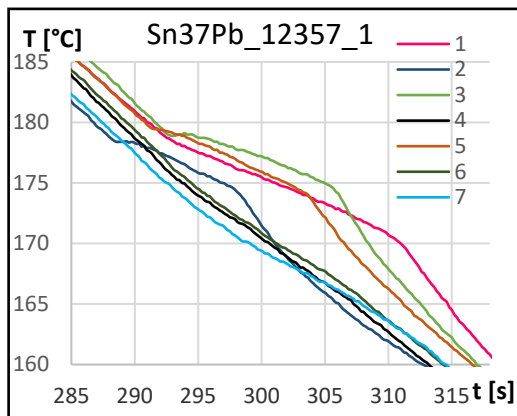
Obr. 6.2.1.3d – průběh 7. přetavení plošek 1, 3 a 5

U modelové DPS, kde jsou 3 pájené spoje, je z grafů zřejmé, že dochází k výraznějšímu ovlivnění okolních plošek bez pájecí slitiny. U plošky 1 je patrná změna s přibývajícím počtem přetavení, od prvního přetavení (obr. 6.2.1.3a), kde není žádný nárůst teploty při přeměně, přes šesté přetavení (obr. 6.2.1.3c), kde je nepatrný nárůst, až k sedmému přetavení (obr. 6.2.1.3d), kde teplota naroste o necelé 3 °C. Je patrný i trvalý pokles bodu nukleace na plošce 1, který od prvního průběhu z 180 °C klesá až na 169 °C v sedmém průběhu.

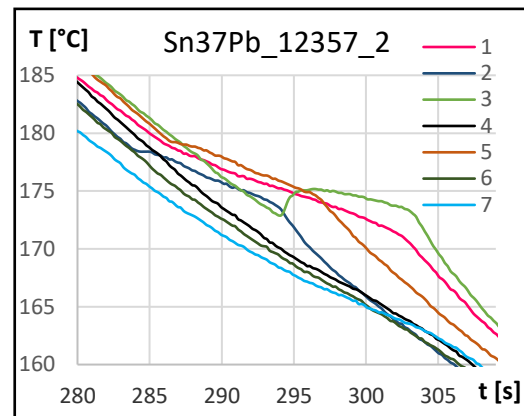
6.2.1.4 TP na ploškách 12357

DPS s pájkou na ploškách 1, 2, 3, 5 a 7 jsou uspořádány do kříže tak, že ploška 1 je ze všech čtyř stran obklopena pájecí ploškou s pájecí slitinou. Teplotní čidlo na plošce 7 je nutné vyřadit z pozorování, protože měřený teplotní profil není v porovnání s ostatními průběhy odpovídající. Pravděpodobně došlo ke špatnému kontaktu mezi termočlánkem

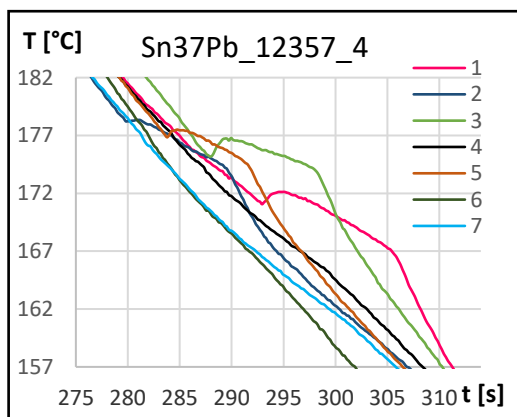
a měděnou ploškou. Nelze tedy komentovat průběh plošky 7, ale vzhledem k souměrnosti modelové desky lze výsledky z plošky 2 považovat za dostačující.



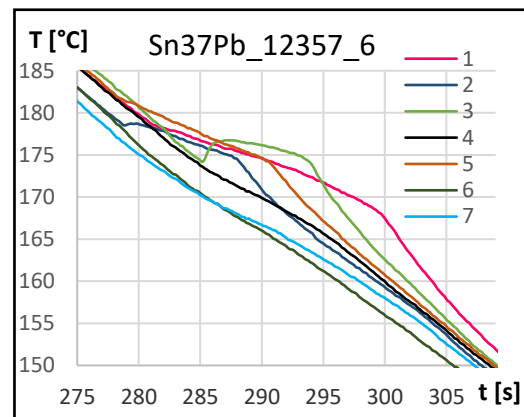
Obr. 6.2.1.4a – průběh 1. přet. plošek 1, 2, 3, 5 a 7



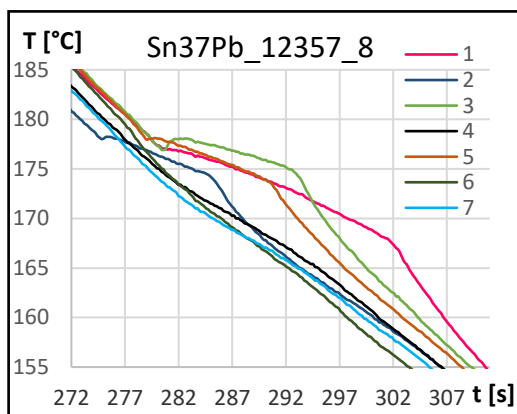
Obr. 6.2.1.4b – průběh 2. přet. plošek 1, 2, 3, 5 a 7



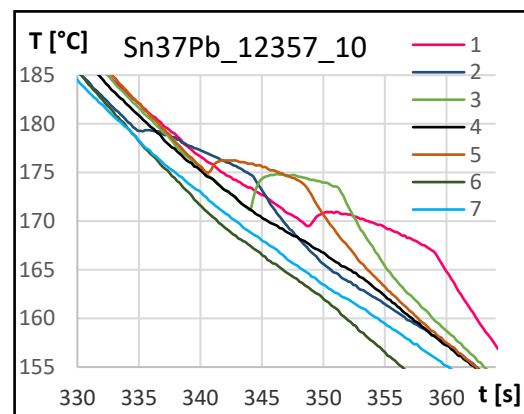
Obr. 6.2.1.4c – průběh 4. přet. plošek 1, 2, 3, 5 a 7



Obr. 6.2.1.4d – průběh 6. přet. plošek 1, 2, 3, 5 a 7



Obr. 6.2.1.4e – průběh 8. přet. plošek 1, 2, 3, 5 a 7



Obr. 6.2.1.4f - průběh 10. přet. plošek 1, 2, 3, 5 a 7

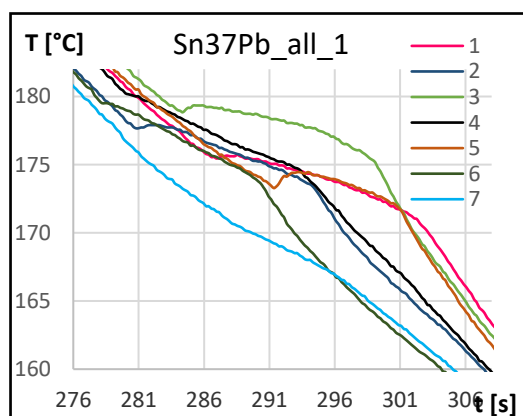
Během prvního přetavení na obr. 6.2.1.4a se pájka na ploškách chová podle teoretických předpokladů cín-olověné pájky a není zaznamenán žádný nárůst teploty v oblasti fázové přeměny L -> S (liquid to solid). V následujících průbězích (obr. 6.2.1.4b) se opět pájka chová tak, že se postupně objevuje nárůst teploty o několik stupňů celsia, zejména u plošky 3 se nárůst

objevuje už při druhém přetavení. Na obr. 6.2.1.4c při 4. přetavení má pájecí slitina na plošce 1 tendenci zpomalit chladnutí při teplotě 176 °C, to je ještě před tím, než sama zahájí transformaci a dojde k rekalescenci až při 171 °C. Tento jev se ještě párkrát zopakuje. Naopak dochází i k jevu, při němž se u pájky opakovaně neobjeví nárůst teploty na plošce 1 (obr. 6.2.1.4e a obr. 6.2.1.4f) a dochází k postupnému chladnutí. Uvolněné teplo z plošek s pájecí slitinou evidentně ovlivňuje chladnutí plošek bez pájky, kde dochází k viditelnému zpomalení rychlosti chlazení.

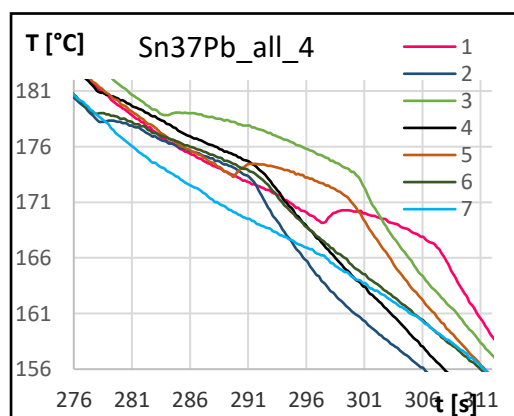
6.2.1.5 TP na všech ploškách

Při variantě s pájkou na všech ploškách se vyskytl stejný problém jako u předchozí podkapitoly, teplotní čidlo na plošce 7 nereaguje na nanesenou pájecí slitinu, nejsou tedy do výsledků zahrnuta odpovídající naměřená data.

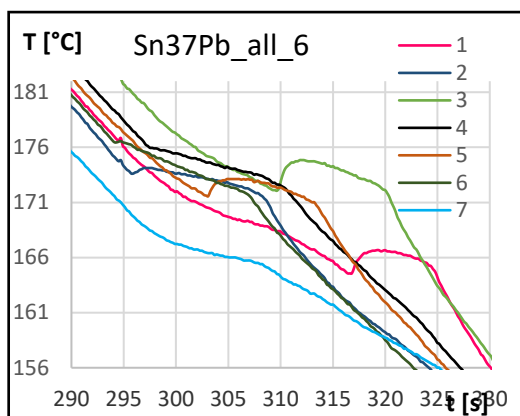
Při prvním přetavení na obr. 6.2.1.5a dochází u plošek 1, 2, 3 a 5 k nepatrnému nárůstu teploty při transformaci skupenství L → S. Lze předpokládat, že k podobnému nárůstu dochází i na plošce 7. Při dalších přetaveních dochází k výraznější rekalescenci i u plošek 4 a 6, které se nacházejí v rozích pomyslného obdélníku. Na obr. 6.2.1.5c během šestého přetavení se pájecí slitina na plošce 1 dostává k bodu nukleace na 165 °C. Opět je před tím ovlivněna okolními ploškami a dochází zde k výraznému podchlazení slitiny. K rekalescenci dochází v době, kdy většina plošek prošla všemi fázemi od podchlazení až po uvolnění významného množství latentního tepla. Lze pozorovat vliv tepla z modelové desky na teplotní čidlo pod ploškou 7, které dle výsledků není dostatečně přikontaktované k plošce. Šířením tepla deskou se zde zpomaluje chladnutí, se zpožděním 5 až 10 sekund se vyrovnávají rozdílné teplotní potenciály.



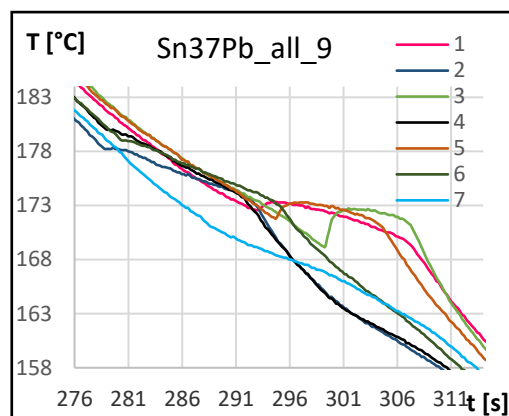
Obr. 6.2.1.5a – průběh 1. přetavení všech plošek



Obr. 6.2.1.5b – průběh 4. přetavení všech plošek



Obr. 6.2.1.5c – průběh 6. přetavení všech plošek



Obr. 6.2.1.5d – průběh 9. přetavení všech plošek

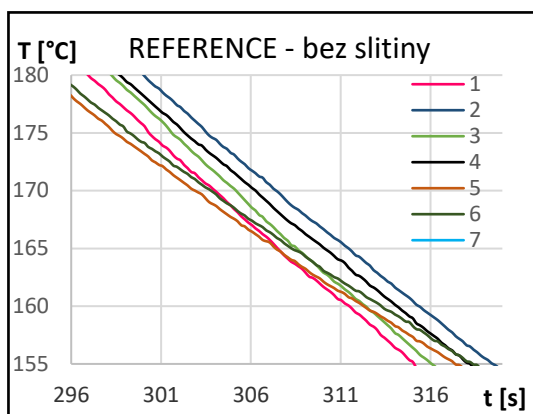
6.2.2 Teplotní profily slitiny SAC387

V této podkapitole jsou popsány průběhy teplotních profilů modelové DPS s pájecí slitinou SAC387. Měřené jsou stejné varianty, jako u pájky Sn37Pb (viz Tab. 6.1). Pájecí slitina SAC387 obsahuje 95,5 % cínu, 3,8 % stříbra a 0,7 % mědi a patří tedy mezi bezolovnaté pájky.

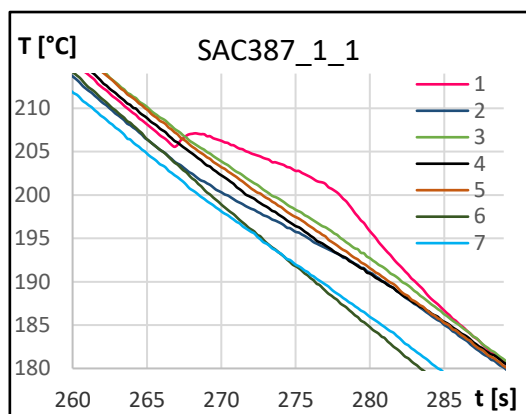
6.2.2.1 TP na plošce 1

Na obr. 6.2.2.1a je výřez grafu prvního přetavení slitiny SAC378 na plošce 1 modelové DPS. Ve slitině dochází k rekalescenci při 205,5 °C a teplota narůstá na 207 °C. Latentní teplo se z pájky na plošce 1 uvolňuje 10 sekund s postupným poklesem teploty na 201 °C.

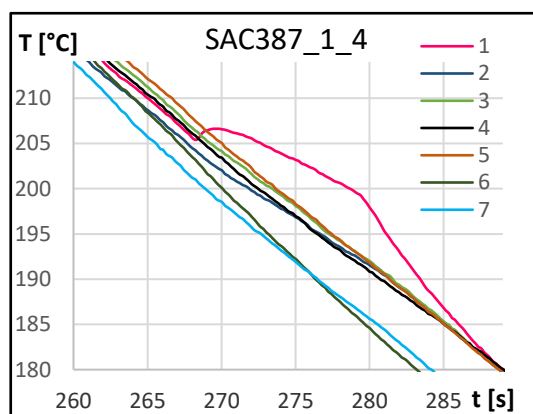
Lze si všimnout vlivu tepla šířícího se DPS na ostatní plošky bez pájecí slitiny, zejména na plošku 2, kde dochází ke zpomalení chladnutí oproti referenčnímu průběhu na obr. 6.2.2. Zpomalení chladnutí na plošce 2 začíná při rekalescenci slitiny na plošce 1 a trvá až do ukončení uvolňování latentního tepla.



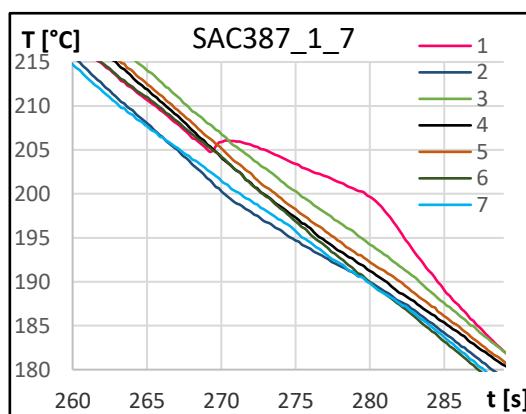
Obr. 6.2.2.1a – referenční průběh – bez slitiny



Obr. 6.2.2.1b – průběh 1. přetavení plošky 1



Obr. 6.2.2.1c – průběh 4. přetavení plošky 1



Obr. 6.2.2.1d – průběh 7. přetavení plošky 1

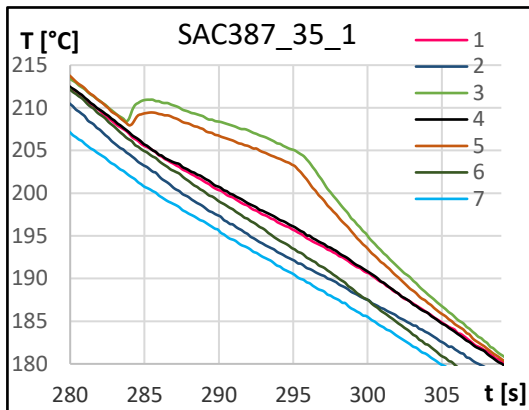
S přibývajícím počtem přetavení (obr. 6.2.2.1b a obr. 6.2.2.1c) se teplotní profily měřených plošek chovají velmi podobně, jako při prvním přetavení (obr. 6.2.2.1a).

6.2.2.2 TP na ploškách 35

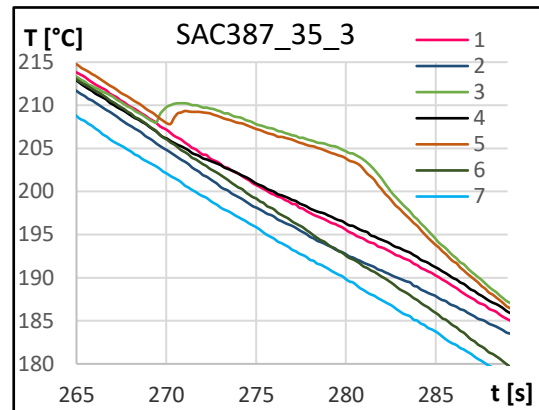
Při prvním přetavení (obr. 6.2.2.2a) slitiny na plošce 3 dochází k rekalescenci při 209 °C a teplota naroste o 2 °C. Na plošce 5 k rekalescenci dochází při 208 °C a teplota naroste o 1,5 °C. Uvolňování latentního tepla trvá 10 sekund, po tu dobu je zpomalené chladnutí z původní hodnoty 1,25 K/s na 0,7 K/s. K stejným výsledkům dochází i při třetím přetavení (obr. 6.2.2.2b).

Při pátém přetavení (obr. 6.2.2.2c) dochází k rozdílům oproti prvním (i třetímu) přetavení. K nukleaci dochází u plošky 3 o 2 °C níže a u plošky 5 o 4 °C níže, rekalescence i doba

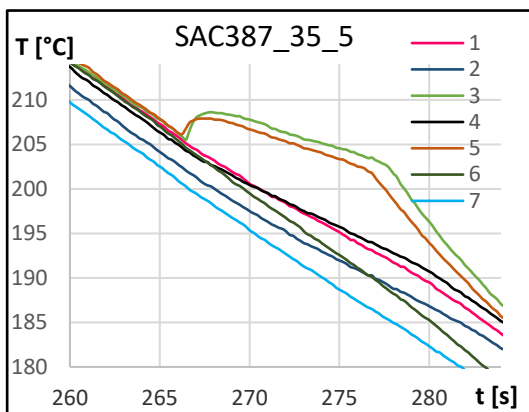
uvolňování latentního tepla jsou u obou plošek srovnatelné s teplotním profilem na obr. 6.2.2.2a.



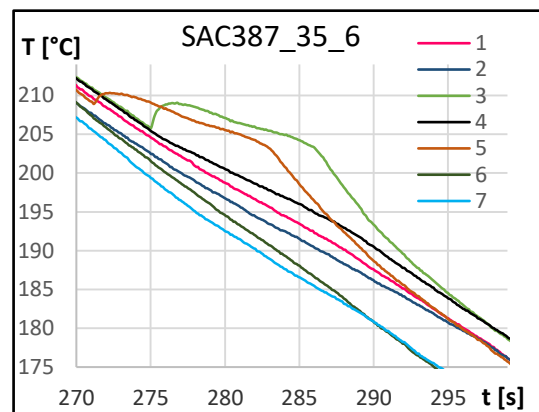
Obr. 6.2.2.2a – průběh 1. přetavení plošek 3 a 5



Obr. 6.2.2.2b – průběh 3. přetavení plošek 3 a 5



Obr. 6.2.2.2c – průběh 5. přetavení plošek 3 a 5



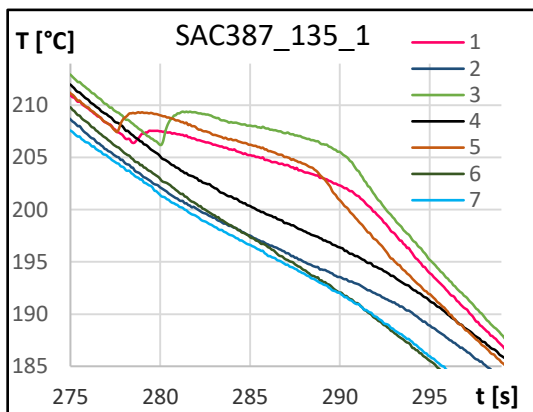
Obr. 6.2.2.2d – průběh 6. přetavení plošek 3 a 5

V grafu s teplotními průběhy z šestého přetavení (obr. 6.2.2.2d) je patrné, že dochází k rekalescenci ve slitině na plošce 5 při 205,5 °C a teplota narůstá na 209 °C. Ve slitině na plošce 3 dochází k rekalescenci už při 209 °C a teplota naroste pouze o 1 °C. Trend uvolňování tepla z plošky 3 je ve všech případech stejný, ale teplo z plošky 5 má průběh uvolňování delší, protože k rekalescenci došlo dříve než v předchozích případech a nárůst teploty je významně menší.

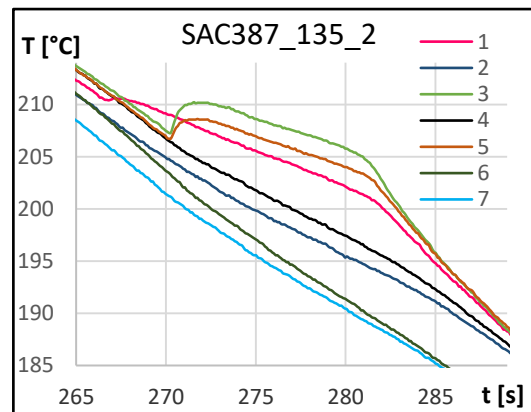
Ze změřených teplotních profilů je zřejmé, že trend ovlivnění okolních plošek, jedná se zejména o plošky 1, 2 a 4, je ve všech případech srovnatelný.

6.2.2.3 TP na ploškách 135

Na modelové DPS jsou 3 pájené plošky s pájecí slitinou, ploška 1, 3 a 5. Na obr. 6.2.2.3a jsou zobrazeny teplotní profily z prvního přetavení a je zřejmé, že u slitiny na plošce 5 dochází k rekalescenci při 207,5 °C, teplota narůstá na 209 °C a latentní teplo se uvolňuje po dobu 10s. Slitina na ploškách 1 a 3 má bod nukleace ve 206,5 °C, k rekalescenci na obou ploškách tedy dochází při stejné teplotě, na plošce 1 je nárůst menší a je zaznamenán o 2 s dříve, než na plošce 3. Latentní teplo obou plošek se přestává uvolňovat přibližně ve stejnou dobu.

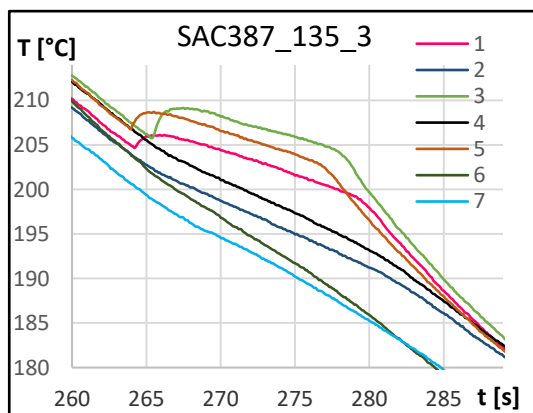


Obr. 6.2.2.3a – průběh 1. přetavení plošek 1, 3 a 5

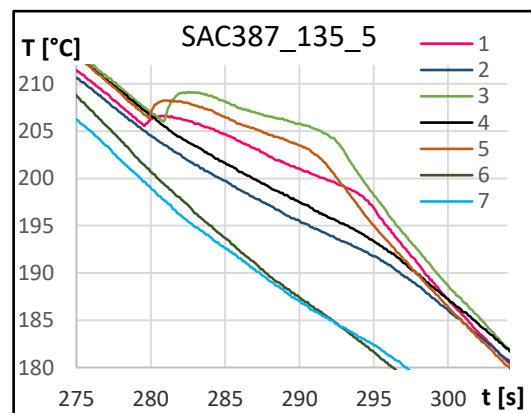


Obr. 6.2.2.3b – průběh 2. přetavení plošek 1, 3 a 5

Při druhém přetavení (obr. 6.2.2.3b) nastává rekalescence ve slitině na plošce 1 už při 210,5 °C, nárůst teploty je zanedbatelný a latentní teplo se uvolňuje po dobu 16 s. Na plošce 3 nedochází k výraznější změně vůči prvnímu přetavení. Ale slitina na plošce 5 se oproti prvnímu přetavení dostává k bodu nukleace na 206,5 °C, tedy na stejnou hodnotu jako slitina na plošce 3, a trend rekalescence a uvolnění latentního tepla se nemění.



Obr. 6.2.2.3c – průběh 3. přetavení plošek 1, 3 a 5



Obr. 6.2.2.3d – průběh 5. přetavení plošek 1, 3 a 5

Trend průběhu teplotních profilů při třetím přetavení na obr. 6.2.2.3c a při pátém přetavení na obr. 6.2.2.3d je srovnatelný jako při prvním přetavení (obr. 6.2.2.3a).

Opět je u všech teplotních profilů zmíněných v této podkapitole patrný vliv pájených plošek se slitinou na plošky bez slitiny. Teplotní profily zaznamenané na ploškách 2 a 4 mají ve všech čtyřech případech srovnatelný trend chladnutí. Teplotní profily z plošek 6 a 7 nejsou ve srovnání s ostatními profily odpovídající a nejsou tedy zahrnuty do pozorování.

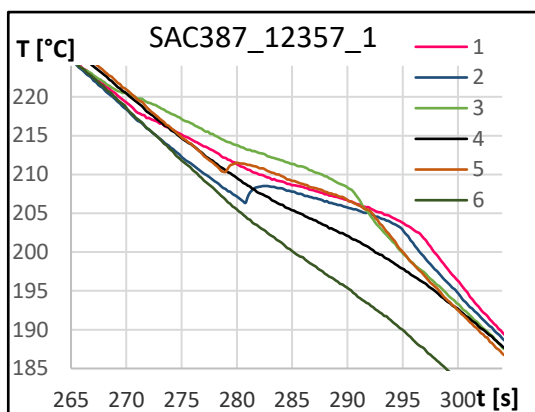
6.2.2.4 TP na ploškách 12357

V této kapitole byly měřeny teplotní profily modelové DPS s pěti pájenými ploškami se slitinou. Jedná se o plošky 1, 2, 3, 5 a 7 a plošky tvoří kříž se středem na plošce 1. Dle změřených teplotních profilů je nutné vyřadit z pozorování průběhy z plošky 7, protože v porovnání s ostatními teplotními profily není průběh odpovídající.

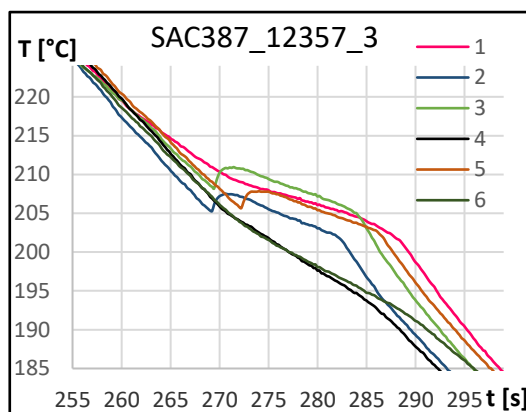
Na obr. 6.2.2.4a je teplotní průběh prvního přetavení modelové desky. Ve slitině u plošek 1 a 3 dochází k uvolnění latentního tepla už při 217 °C – 220 °C a není u nich zaznamenán žádný nárůst teploty.

Z grafu na obr. 6.2.2.4b je patrné, že slitina na plošce 1 začíná uvolňovat teplo při 220 °C a vykresluje parabolickou křivku až do teploty 203 °C. Teplotní profily z plošek 2, 3 a 5 vykazují srovnatelný trend mezi sebou i s prvním přetavením slitiny na ploškách 2 a 3.

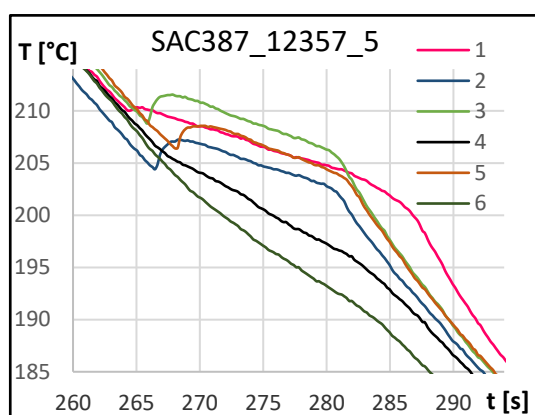
Teplotní průběh slitiny na plošce 1 zaznamenaný na obr. 6.2.2.4c na rozdíl od předchozích vykazuje ve 210 °C nárůst teploty o 1 °C. V obr. 6.2.2.4d průběh teploty slitiny na plošce 1 nejdříve ovlivněn uvolněným teplem z okolních plošek (2,3 a 5) a následně dochází k rekalescenci až na úrovni 197 °C v době, kdy je teplo z okolních plošek uvolněné a pájka je po fázové přeměně tuhá.



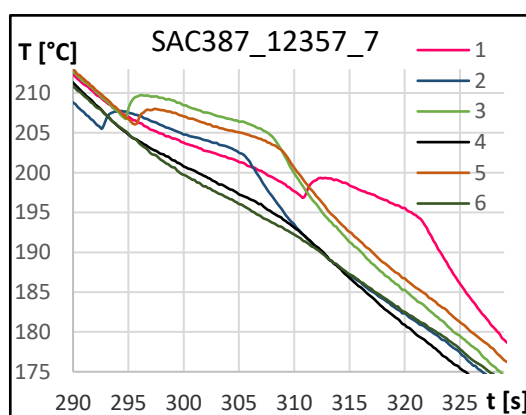
Obr. 6.2.2.4a – průběh 1. přet. plošek 1, 2, 3, 5 a 7



Obr. 6.2.2.4b – průběh 3. přet. plošek 1, 2, 3, 5 a 7



Obr. 6.2.2.4c – průběh 5. přet. plošek 1, 2, 3, 5 a 7



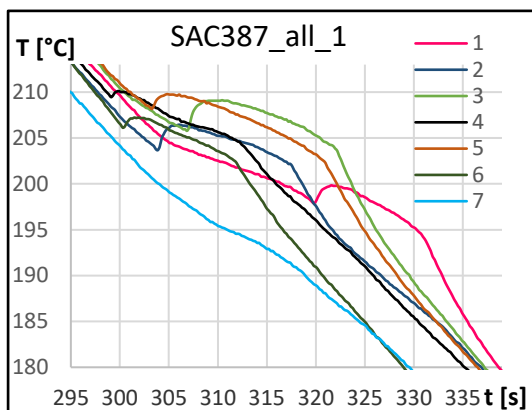
Obr. 6.2.2.4d – průběh 7. přet. plošek 1, 2, 3, 5 a 7

6.2.2.5 TP na všech ploškách

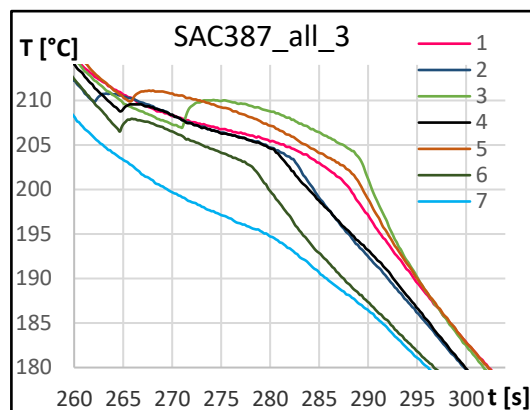
V této podkapitole je probírán průběh přetavení modelové DPS, kde jsou všechny pájené plošky s pájecí slitinou. Průběhy zaznamenané teplotním čidlem je opět nutné vyřadit z pozorování, protože v porovnání s ostatními teplotními profily nejsou odpovídající.

Na obr. 6.2.2.5a je slitina na plošce 1, která je ovlivněna teplem ze slitin z okolních plošek a při 205 °C začíná zpomalovat chladnutí. K rekalescenci dochází až při 198 °C, když už není ovlivňována teplem šířeným z okolních pájených plošek.

Na obr. 6.2.2.5b si lze všimnout, že při třetím přetavení mají teplotní profily pájených plošek 1, 3 a 5 tendenci nechat se ovlivnit teplem z vedlejších plošek a dochází ke zpomalení chladnutí ještě před tím, než se uvolní vlastní latentní teplo.

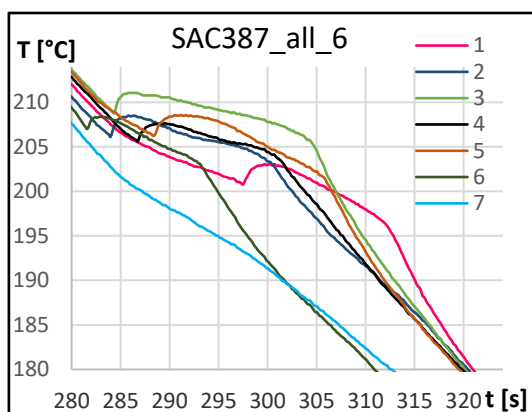


Obr. 6.2.2.5a – průběh 1. přetavení všech plošek

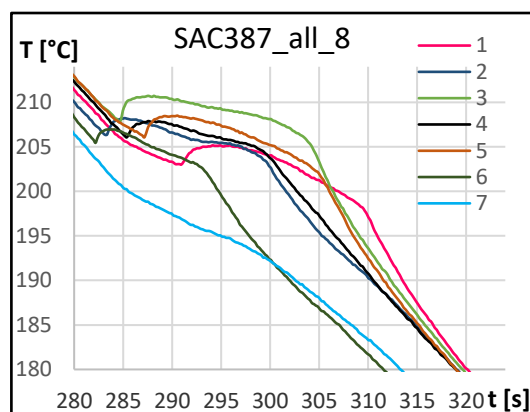


Obr. 6.2.2.5b – průběh 3. přetavení všech plošek

Průběh chlazení slitiny na plošce 1 se na obr. 6.2.2.5c a 6.2.2.5d liší pouze dobou, po kterou je latentní teplo udržované ve slitině vlivem tepla z okolních pájených plošek. Průběhy z ostatních pájených plošek jsou srovnatelné.



Obr. 6.2.2.5c – průběh 6. přetavení všech plošek



Obr. 6.2.2.5d – průběh 8. přetavení všech plošek

7. Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se se vznikem pájeného spoje, tvorbou chemických vazeb mezi pájenými materiály a podmínkami pro jejich vytvoření. Se vznikem pájeného spoje úzce souvisí tvorba intermetalických sloučenin, které lze popsat ve fázových diagramech. Práce se zabývá i vznikem defektů pájení a jejich minimalizací. O těchto oblastech pojednává první kapitola.

V další kapitole byly popsány materiály využívané v elektrotechnice, jejich vlastnosti a použití. Dále byla probrána technologie pájení v elektrotechnice se zaměřením na technologii pájení přetavením a teplotní profily s vysvětlením latentního tepla a jeho průběhu a šíření.

Praktická část práce spočívala ve vytvoření modelové desky plošných spojů, připojení teplotních čidel a měření teplotních profilů dvou pájecích slitin na modelové desce plošných spojů. Bylo měřeno 5 variant pájených plošek s dvěma pájecími slitinami. Každá varianta prošla alespoň pěti průběhy přetavení. Hodnocení výsledků bylo zaměřeno na změny teplotních profilů mezi prvními a dalšími přetaveními jednoho vzorku.

Z výsledků teplotních profilů u olovnaté pájecí slitiny Sn37Pb je zřejmé, že při každém dalším přetavení probíhají difúzní děje a ze slitiny je odsáván cín do měděné plošky. Vytváří se vrstvy intermetalických sloučenin, zejména Cu_6Sn_5 , která zajišťuje kvalitní pájený spoj. Slitina tím mění své složení a v teplotním profilu se to projevuje změnou v oblasti nukleace a rekalescence, při fázové přeměně z kapalné na tuhou formu. V případě bezolovnaté slitiny SAC387 nebyl na teplotním profilu vliv tvorby intermetalických sloučenin zřejmý.

Dále bylo zkoumáno šíření latentního tepla ze slitiny na pájených ploškách deskou plošných spojů a vliv na okolní pájené plošky. Ve variantě s jedním pájeným spojem se vliv na ostatní plošky projevil pouze nepatrně u obou pájecích slitin. U modelové desky plošných spojů s více pájenými ploškami (3 a 5 pájených plošek) byl zaznamenán výraznější vliv na plošky bez slitiny. Dochází ke zpomalení chladnutí z původních 1,25 K/s až na 0,6 – 0,7 K/s, po dobu uvolňování latentního tepla. Při variantě s pěti a devíti pájenými ploškami se slitinou se projevil vliv latentního tepla vzájemně na pájené plošky. U pájecí slitiny Sn37Pb nejzřetelnější vliv nastal ve variantě s devíti pájenými ploškami u prostřední plošky, kdy k rekalescenci došlo při teplotě o 10 °C nižší než u okolních plošek. U slitiny SAC387 došlo k nejvýraznějšímu vlivu taktéž u prostřední plošky, k němuž došlo v křížové variantě pěti pájených plošek se slitinou i ve variantě s devíti pájenými ploškami. V křížové variantě došlo k rekalescenci na prostřední pájené plošce při 197 °C, o 9 °C níže než na ostatních. Ve variantě s devíti pájenými ploškami došlo k rekalescenci při 197 °C, o 10 až 11 °C níže než na ostatních. V obou variantách se jedná o podobné hodnoty, rozdíl je v době, po kterou trvá vliv okolí a následná samotná rekalescence a uvolnění latentní energie. Ve variantě s pěti pájenými ploškami děj trval 25 – 27 s, naopak ve variantě s devíti pájenými ploškami děj trval 30 – 33 s. Z toho usuzuji, že tepelná energie šířená z okolních plošek zabraňuje náhlému uvolnění energie ze slitiny na prostřední plošce. V několika teplotních profilech je zaznamenáno, že k náhlému uvolnění energie nedojde a průběh je hladký.

V této práci se podařilo zjistit, že vícenásobné přetavení slitiny na desce plošných spojů mění složení pájky tím, že cín je z pájky odsáván do mědi na DPS. Slitina změnou složení mění i své vlastnosti. Dále bylo prokázáno, že uvolněná tepelná energie má vliv na šíření okolní energie.

8. Seznam symbolů a zkratek:

DPS – deska plošných spojů

SMT – surface mount technology (technologie povrchové montáže)

SMD – surface mount device (součástky povrchové montáže)

THT – through-hole technology (technologie osazování plošných spojů součástkami s vývody)

THD – through-hole device (součástky s drátovými vývody)

TP – teplotní profil

SAC – slitina cínu Sn, stříbra Ag a mědi Cu

λ – součinitel teplotní vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

q – hustota tepelného toku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

ϑ – teplota [K]

$\text{grad}\vartheta$ – teplota [$\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$]

Q – tepelná energie [J; Ws]

S – plocha [m^2]

E – vyzářená energie [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]

t – čas [s]

R_T – tepelný odpor [$\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]

G_T – tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$]

α – součinitel přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]

9. Literatura:

9.1 Knižní zdroje:

- [2] PUTTLITZ K. J., STALTER K. A.: Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies, Marcel Dekker, Inc., NEW YORK - BASE 2004
- [15] ZHAO, J.-C.: Methods for Phase Diagram Determination, ELSEVIER, ISBN: 978-0-08-044629-5, 5.5. 2011
- [19] MACH Pavel, SKOČIL Vlastimil, URBÁNEK Jan: Montáž v elektronice, Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje, Vydavatelství ČVUT, Praha 2001
- [20] ABEL, Martin, CIMBUREK, Vladimír: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, s.r.o., Pardubice 2005
- [24] MORANDO, C., FORNARO O., GARBELLINI O. & PALACIO H.: Fluidity of Sn-based eutectic solder alloys. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 2015
- [25] ZAHRADNÍK, Vít: Studium vlivu latentního tepla u pájení přetavením, ČVUT, Praha 2015

9.2 Elektronické zdroje:

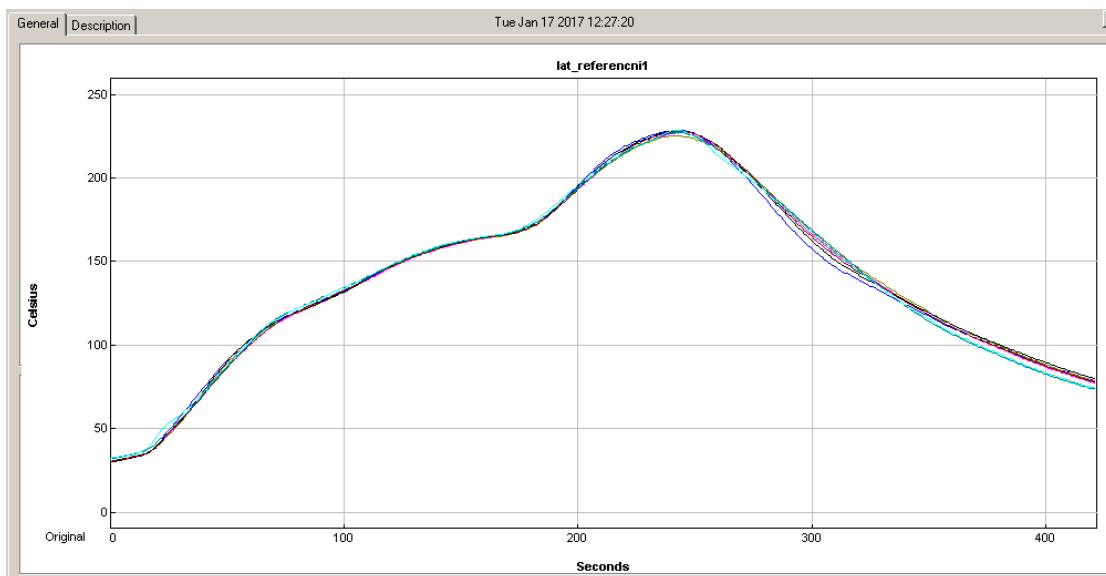
- [1] DVOŘÁK, Karel: Historie svařování v českých zemích. Úvod do historie svařování. Příspěvek č. 2: POČÁTKY SPOJOVÁNÍ KOVŮ [online]. [cit. 5..2017]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=239>
- [3] KOVOHUTĚ Příbram: [online]. [cit. 24.3.2017]. Dostupné z: http://www.kovopb.cz/userdata/pages/12/dp-solders_pb.pdf
- [4] Obrázek běžného kalafunového tavidla. Dostupné z: http://www.elektro-hofman.cz/_obchody/elektro-hofman.shop5.cz/prilohy/1/f173affd_0.jpg.big.jpg
- [5] KOVOHUTĚ Příbram: [online]. [cit. 24.3.2017]. 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. 24.3.2017]. Dostupné z: http://ocw.cvut.cz/moodle/file.php/289/cviceni_-_l._blok/uloha_6.pdf
- [7] Multimediální výukový systém, VUT v Brně, [online]. [cit. 24.3.2017]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice/>
- [8] SMT Centrum. Pájení. Pájení přetavením [online]. [cit. 25.3.2017]. 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. 25.3.2017]. Dostupné z: http://www.smtcentrum.cz/data/Images/galleries/big/eutekticka-pajka_128556967214.927.JPG,
- [10] Early stage growth characteristics of Ag₃Sn intermetallic compounds during solid–solid and solid–liquid reactions in the Ag–Sn interlayer system: Experiments and simulations [online]. [cit. 25.4.2017]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Christian_Leinenbach/publication/265519307/figure/fig1/AS:392251273433088@1470531399156/Fig-1-Binary-Ag-Sn-phase-diagram.png
- [11] Material Measurement Laboratory. Phase Diagrams & Computational Thermodynamics [online]. [cit. 25.3.2017]. Dostupné z: <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/cusnw.jpg>
- [12] InTech – Open Science | Open minds [online]. [cit. 20.4.2017]. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/source/html/38577/media/image18.png>
- [13] SZENDIUCH, Ivan: PROBLÉM PŘECHODU NA BEZOLOVNATÉ PÁJKY [online]. [cit. 20.4.2017]. Dostupné z: <http://www.marpos.cz/leadfree/sz4.jpg>
- [14] SMD. Připojování součástek v elektronice [online]. [cit. 20.4.2017]. Dostupné z: <http://telefon.unas.cz/sell/image/obr1.gif>
- [16] Fázové diagramy, [online]. [cit. 17.4.2017]. Dostupné z: http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_6_5_diagram/kap_6_5_faz_diagram.htm
- [17] Požární odolnost, ČVUT Fakulta Stavební, [online]. [cit. 12.5.2017]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/1/1-2_Vedeni_tepla.pdf

- [18] VOLF Ivo, JAREŠOVÁ Miroslava, OUHRABKA Miroslav. Přenos tepla: Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku [online]. [cit. 26.4.2017]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>
- [21] SMT centrum. Výběr tavidel [online]. [cit. 15.5.2017]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyber-tavidel/pryskyricna-tavidla-na-bazi-kalafuny/>
- [22] SMT centrum. Výběr tavidel [online]. [cit. 15.5.2017]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyber-tavidel/synteticka-tavidla/>
- [23] SMT centrum. Výběr tavidel [online]. [cit. 15.5.2017]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyber-tavidel/tavidla-bez-cisteni/>
- [26] Low-mass solution to 'tombstone' dilemma is identified [online]. [cit. 19.5.2017]. Dostupné z: <https://abm-website-assets.s3.amazonaws.com/mdtmag.com/s3fs-public/legacyimages/img13.jpg>
- [27] Modern information that helps us understand casting practises, [online], [cit. 27.4.2017] Dostupné z: <https://medievalfoundry.files.wordpress.com/2016/02/leaded-bronze-phase-diagram.jpg?w=440>
- [28] Tavidla rozpustná ve vodě: [online]. [cit. 16.4.2017]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyber-tavidel/tavidla-rozpustna-ve-vode/>
- [29] Tavidla rozpustná v rosouštědle: [online]. [cit. 16.4.2017]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyber-tavidel/tavidla-rozpustna-v-rozpustedle/>

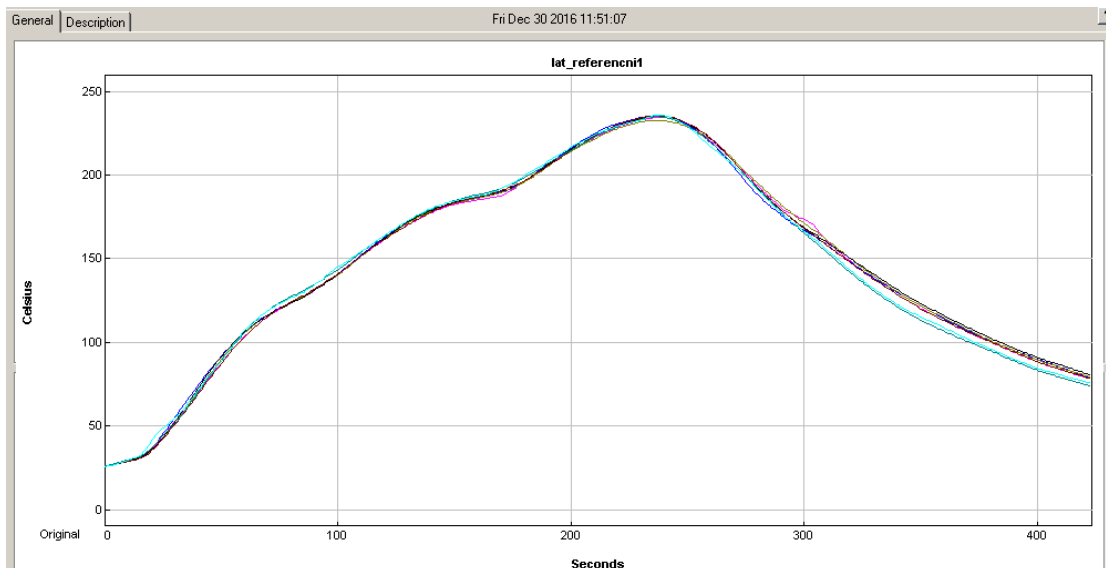
10. Vybrané přílohy

10.1 Přílohy – referenční teplotní profil – bez slitiny

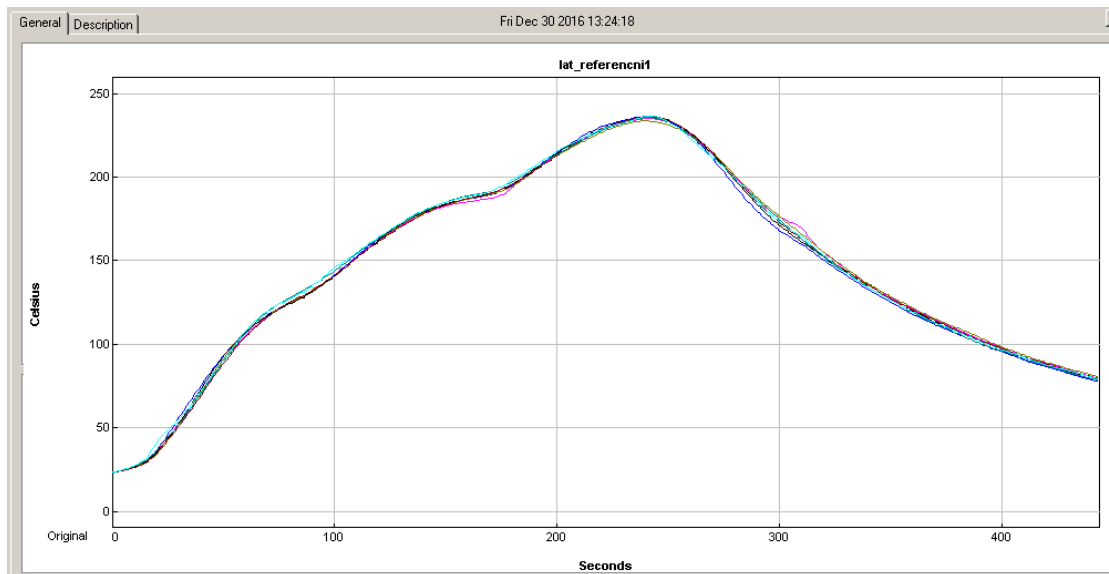


10.2 Přílohy slitiny Sn37Pb

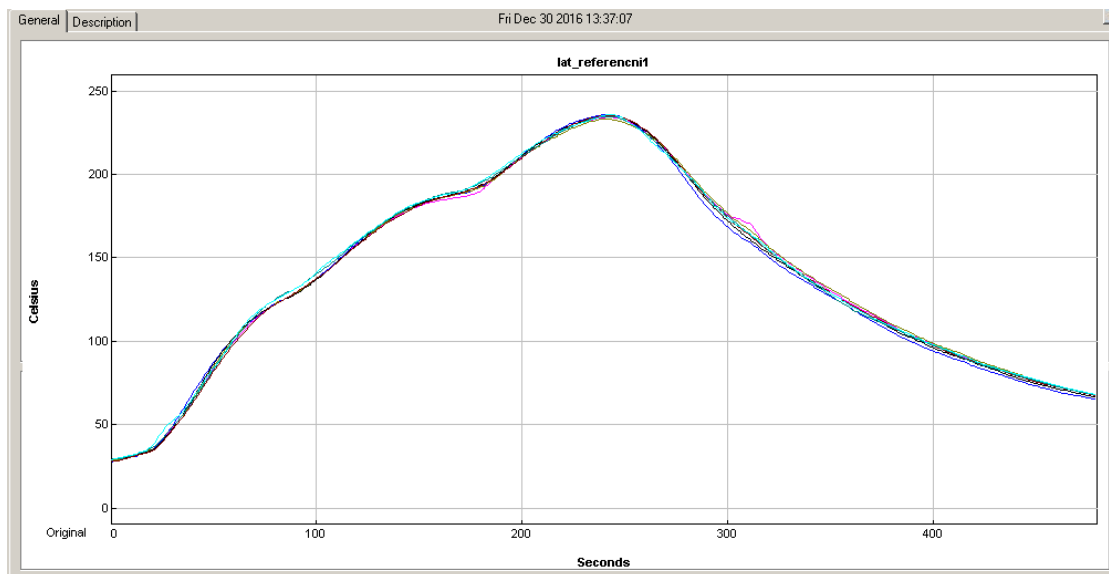
10.2.1 Teplotní profil Sn37Pb, pájená ploška 1 se slitinou, 1. přetavení



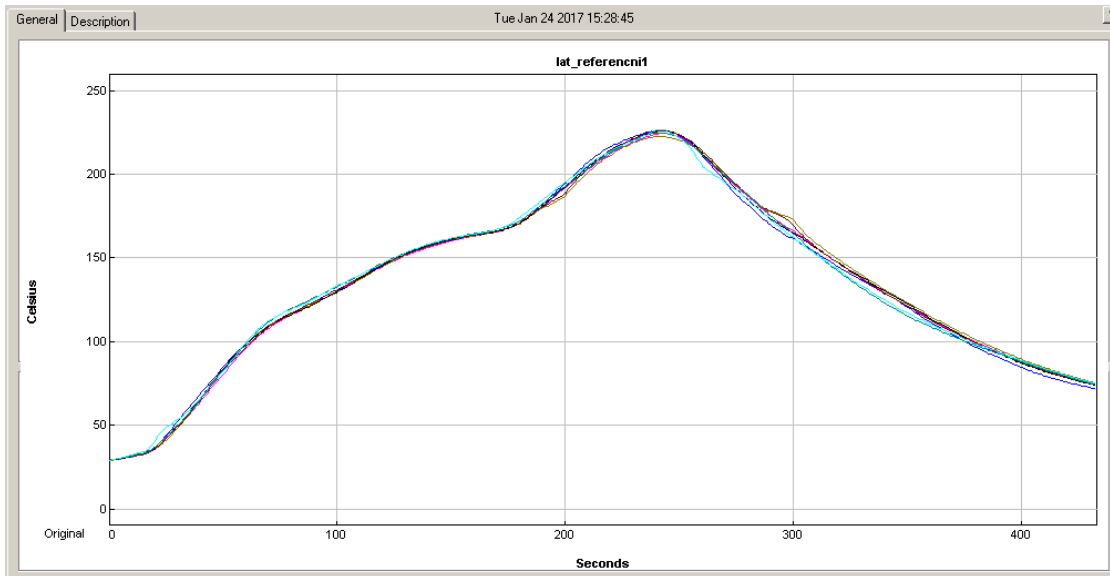
10.2.2 Teplotní profil Sn37Pb, pájená ploška 1 se slitinou, 3. přetavení



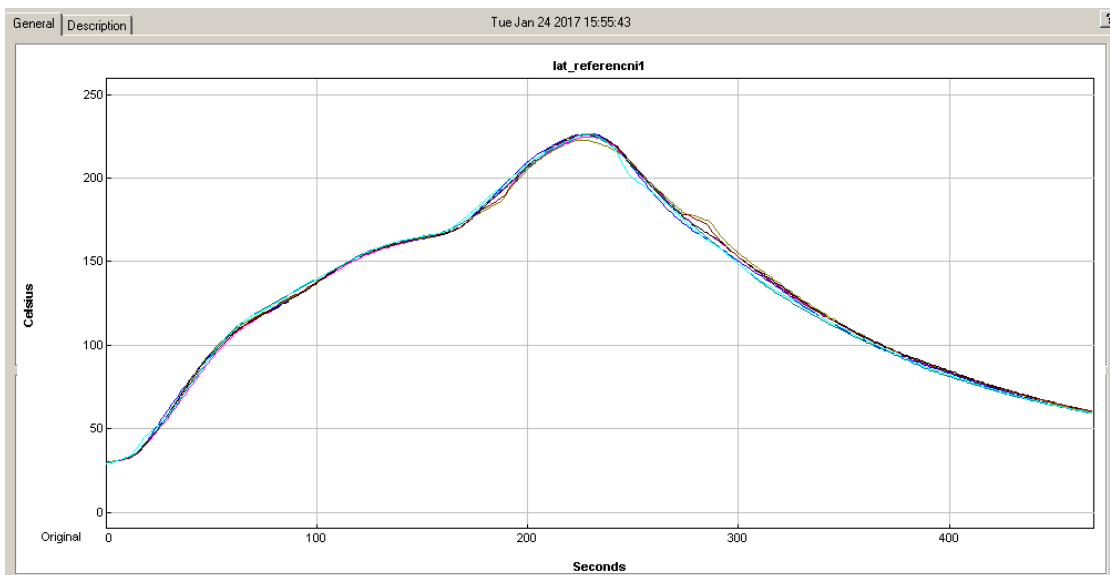
10.2.3 Teplotní profil Sn37Pb, pájená ploška 1 se slitinou, 4. přetavení



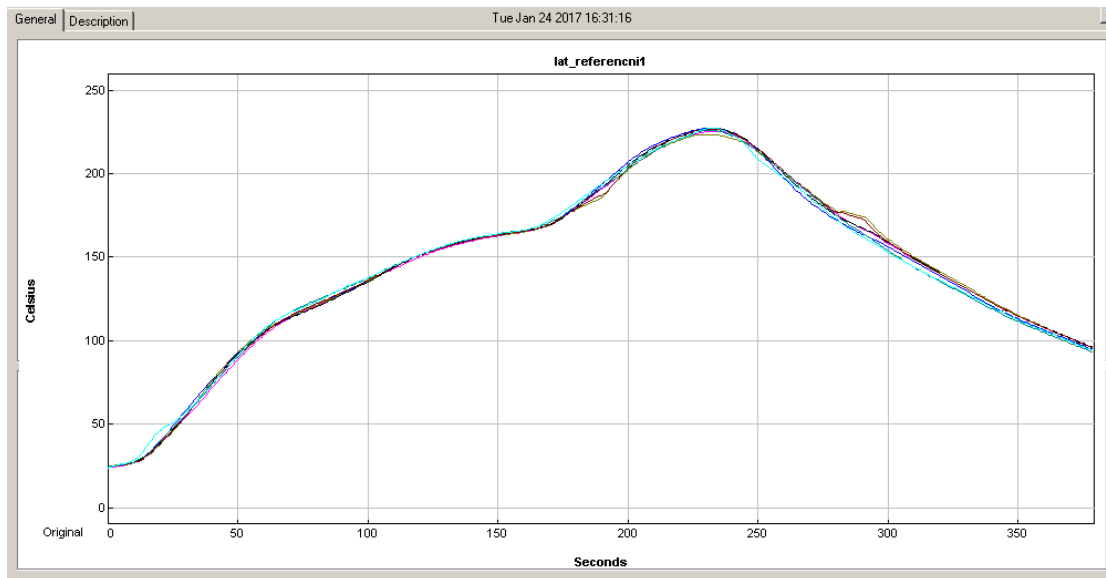
10.2.4 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 3 a 5 se slitinou, 1. přetavení



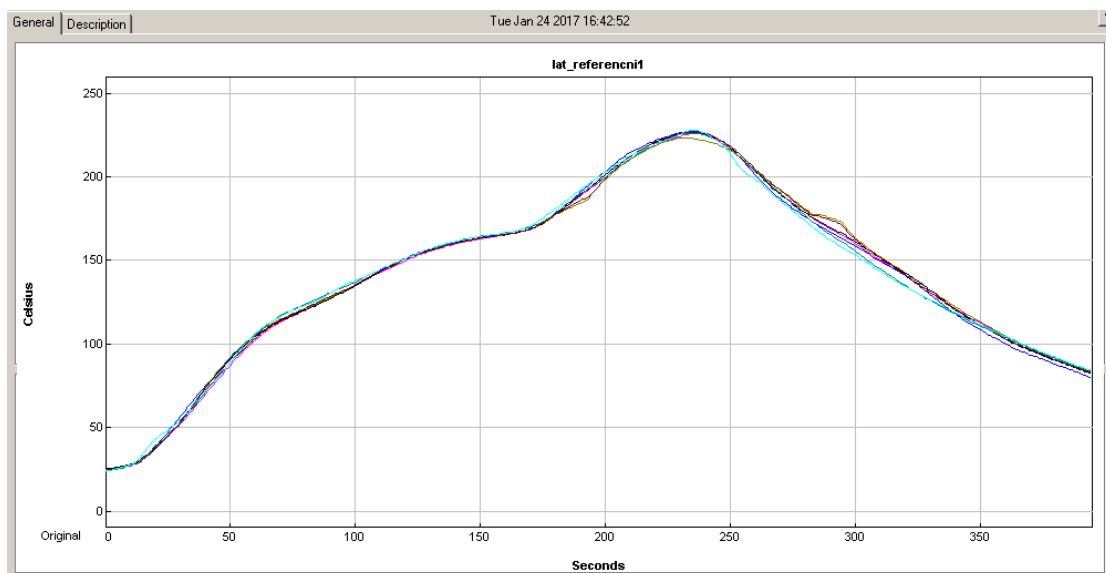
10.2.5 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 3 a 5 se slitinou, 3. přetavení



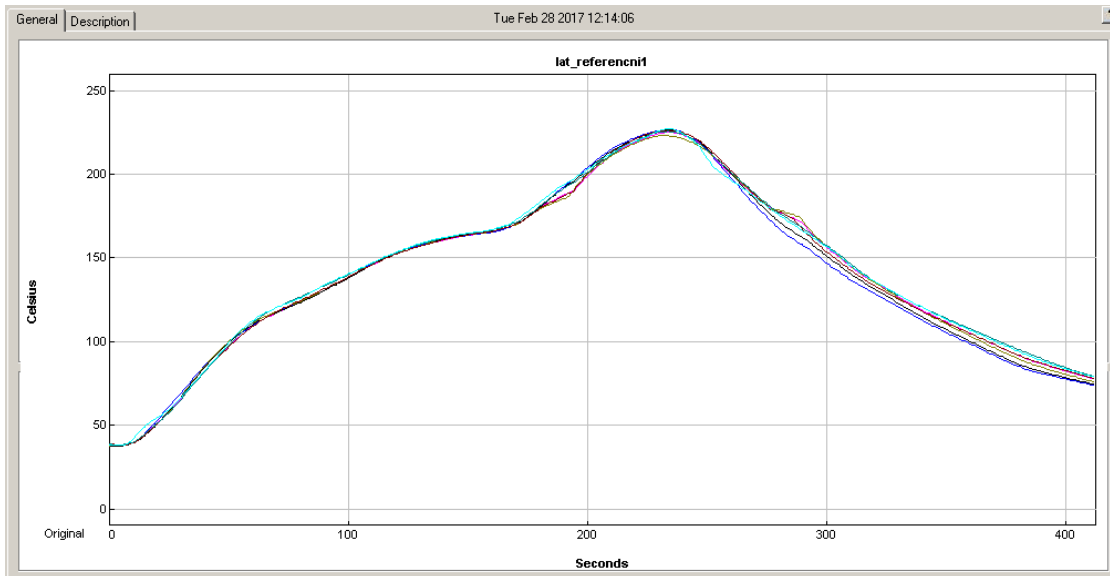
10.1.6 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 3 a 5 se slitinou, 5. přetavení



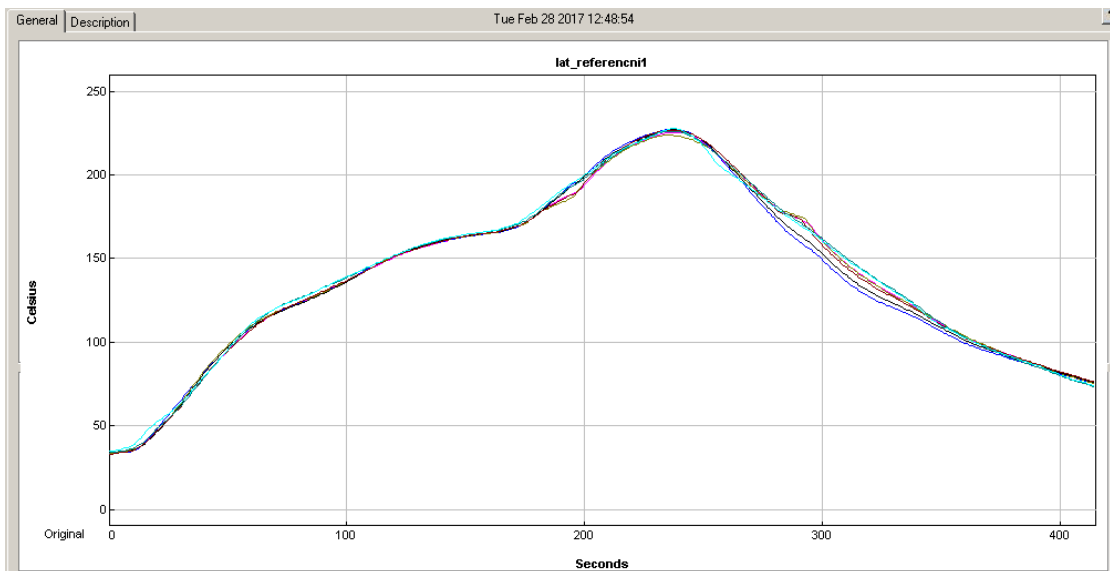
10.1.7 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 3 a 5 se slitinou, 6. přetavení



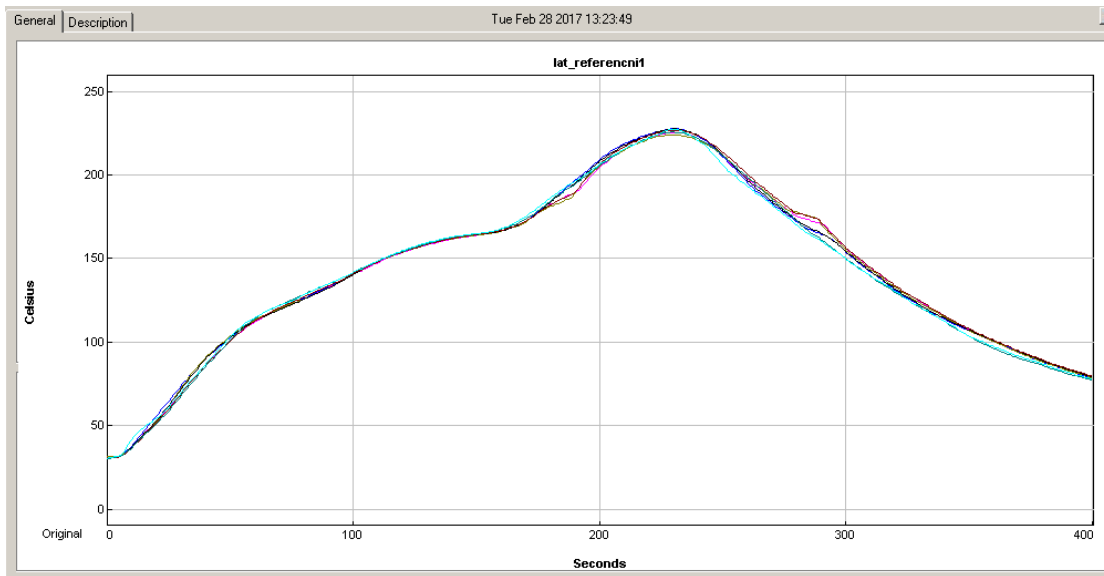
10.1.8 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 1, 3 a 5 se slitinou, 1. přetavení



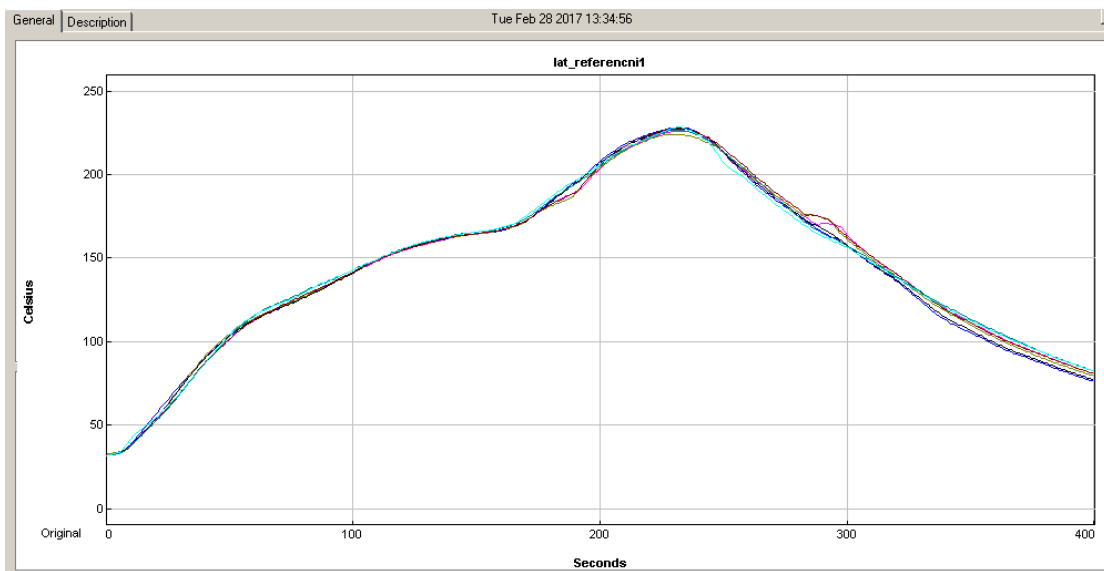
10.1.9 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 1, 3 a 5 se slitinou, 3. přetavení



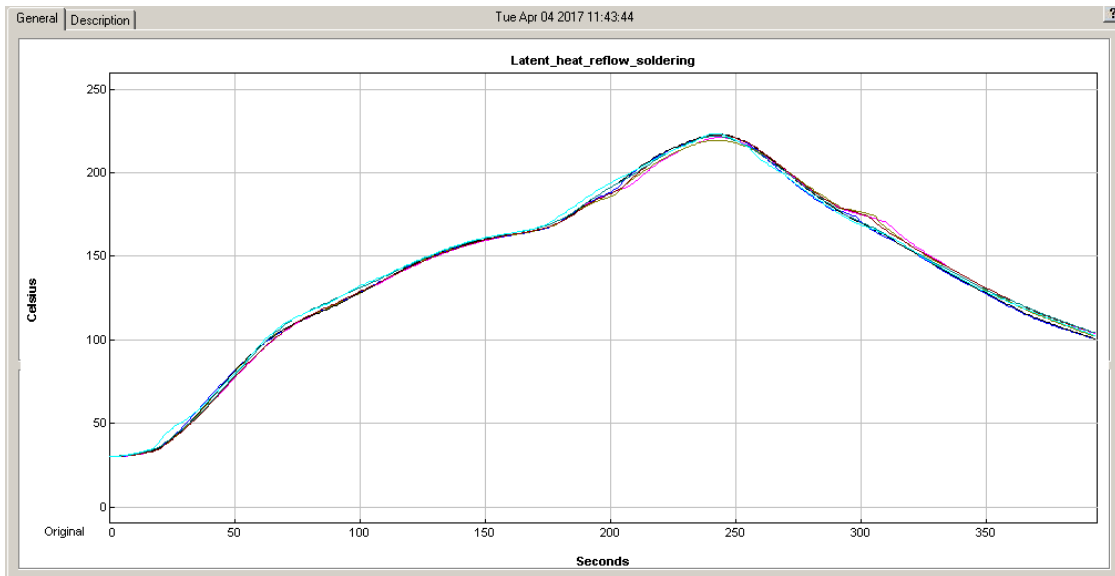
10.1.10 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 1, 3 a 5 se slitinou, 6. přetavení



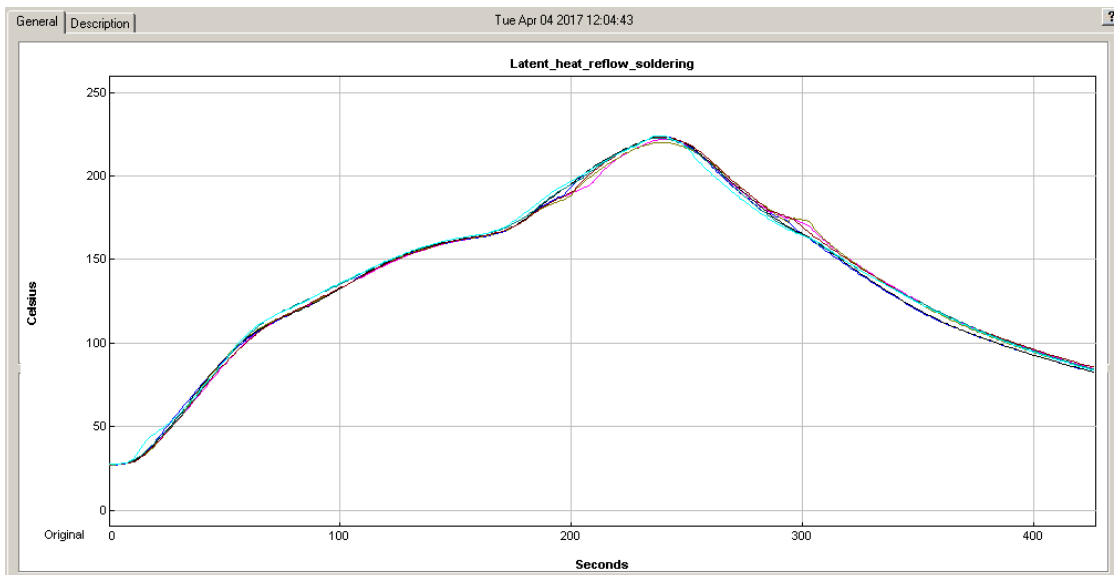
10.1.11 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 1, 3 a 5 se slitinou, 7. přetavení



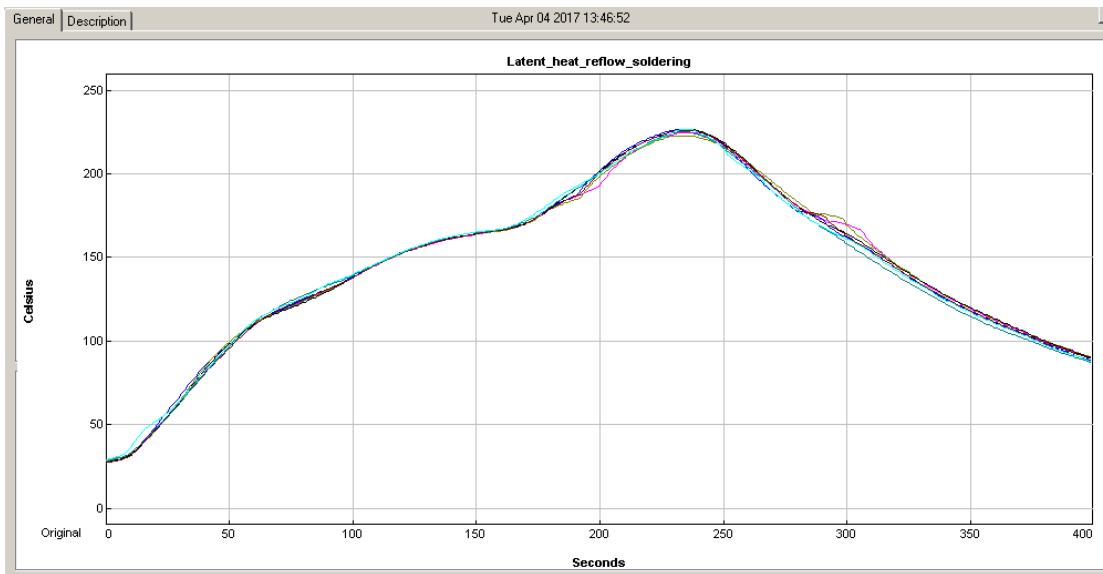
10.1.12 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 1, 2, 3, 5 a 7 se slitinou, 1. přetavení



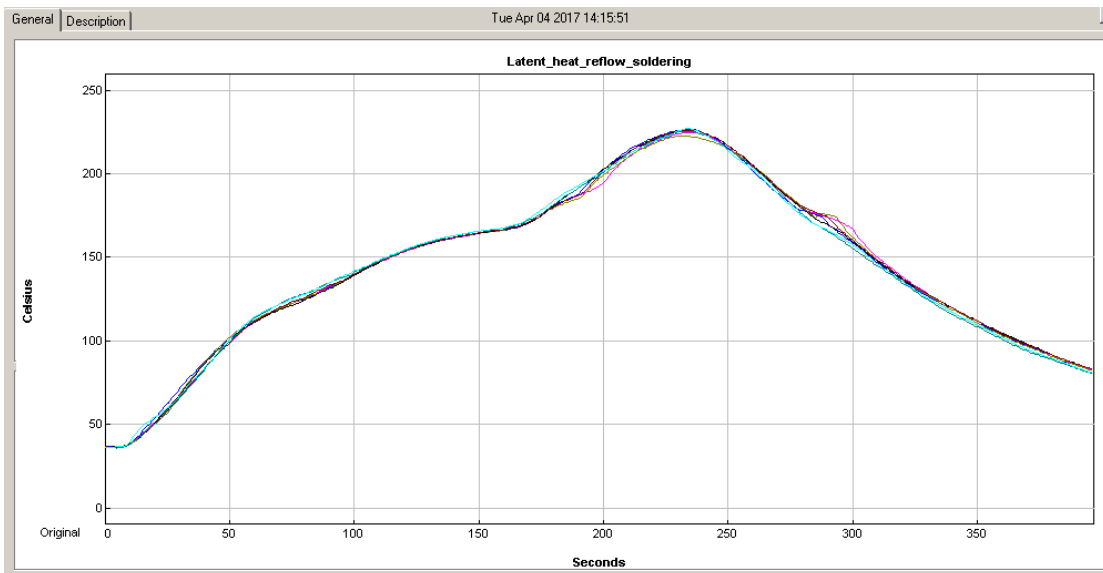
10.1.13 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 1, 2, 3, 5 a 7 se slitinou, 2. přetavení



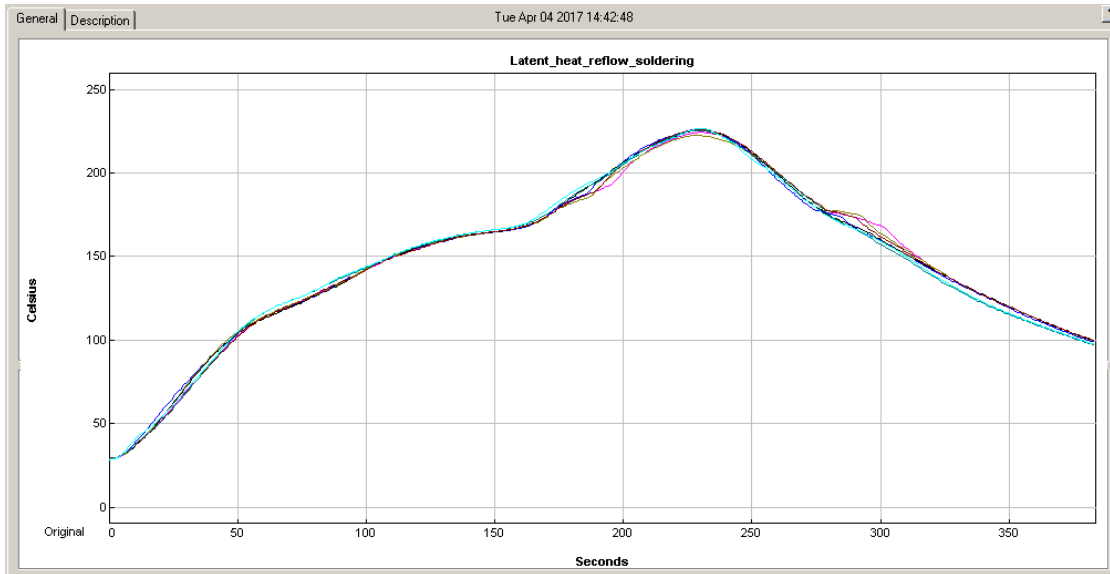
10.1.14 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 1, 2, 3, 5 a 7 se slitinou, 4. přetavení



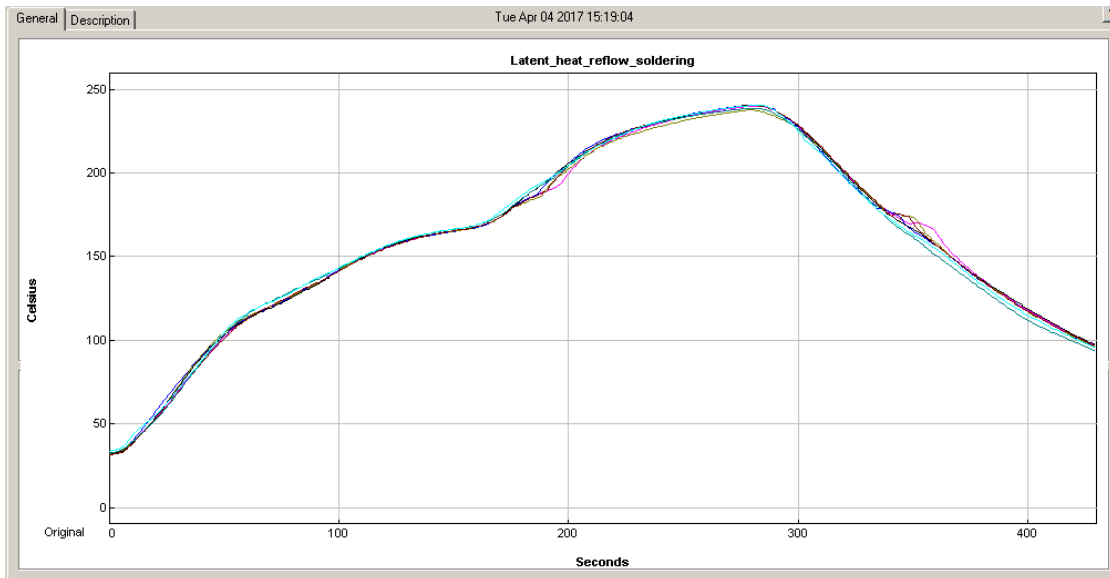
10.1.15 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 1, 2, 3, 5 a 7 se slitinou, 6. přetavení



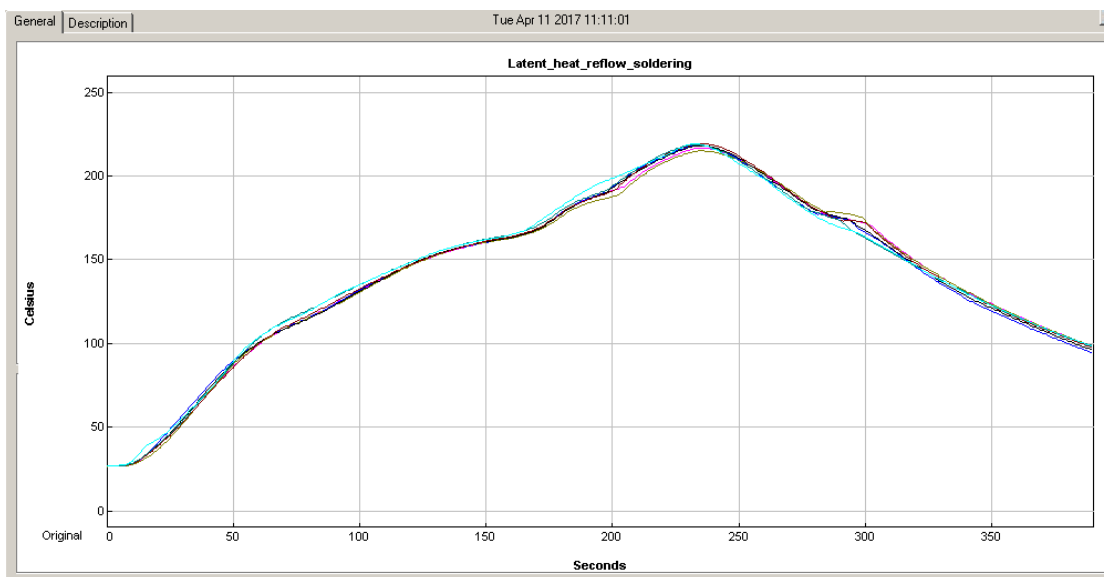
10.1.16 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 1, 2, 3, 5 a 7 se slitinou, 8. přetavení



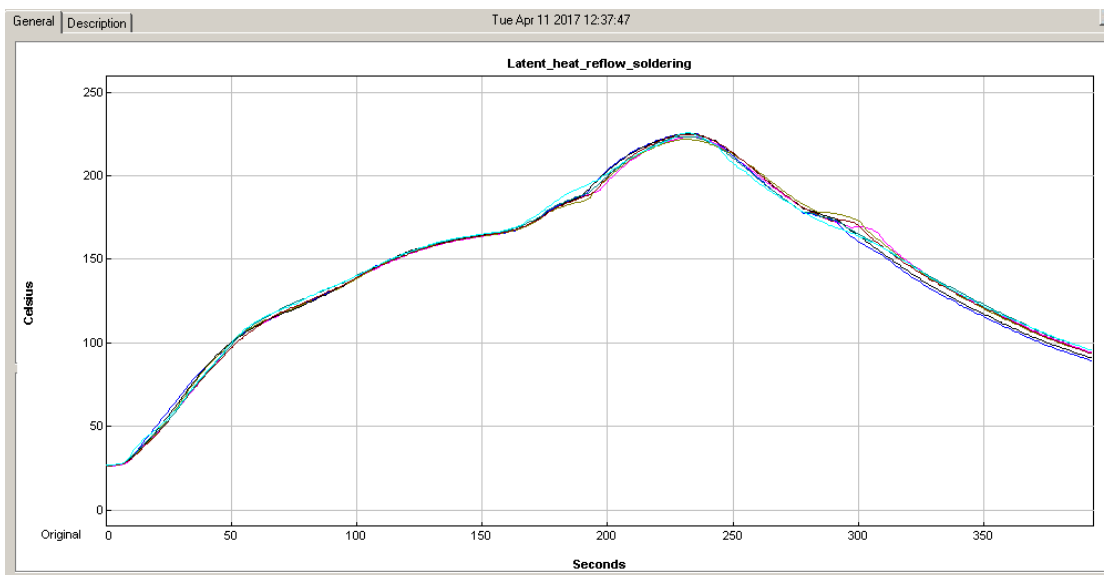
10.1.17 Teplotní profil Sn37Pb, pájené plošky 1, 2, 3, 5 a 7 se slitinou, 10. přetavení



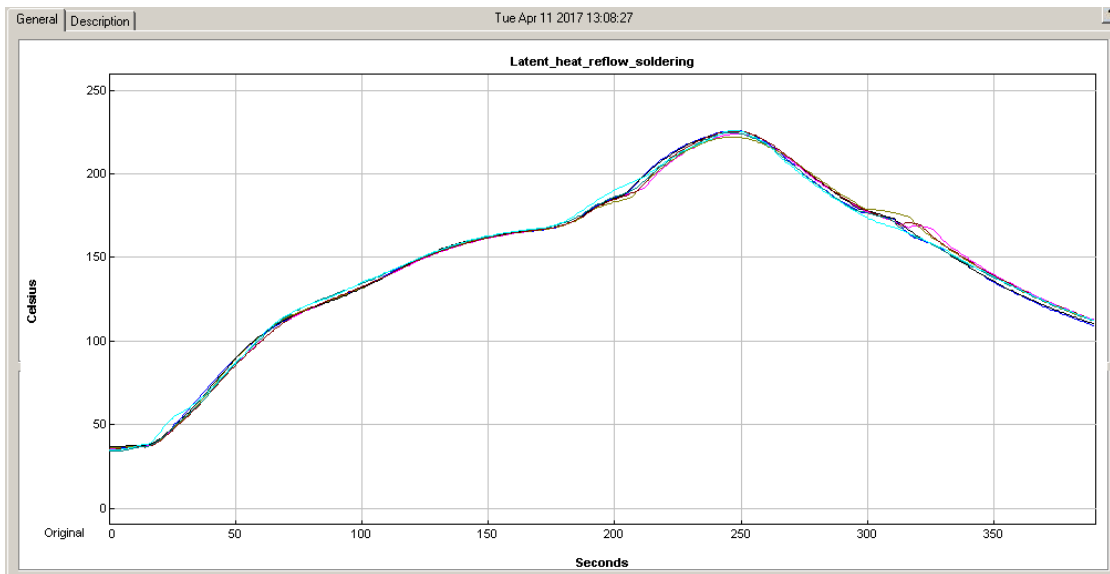
10.1.18 Teplotní profil Sn37Pb, všechny pájené plošky se slitinou, 1. přetavení



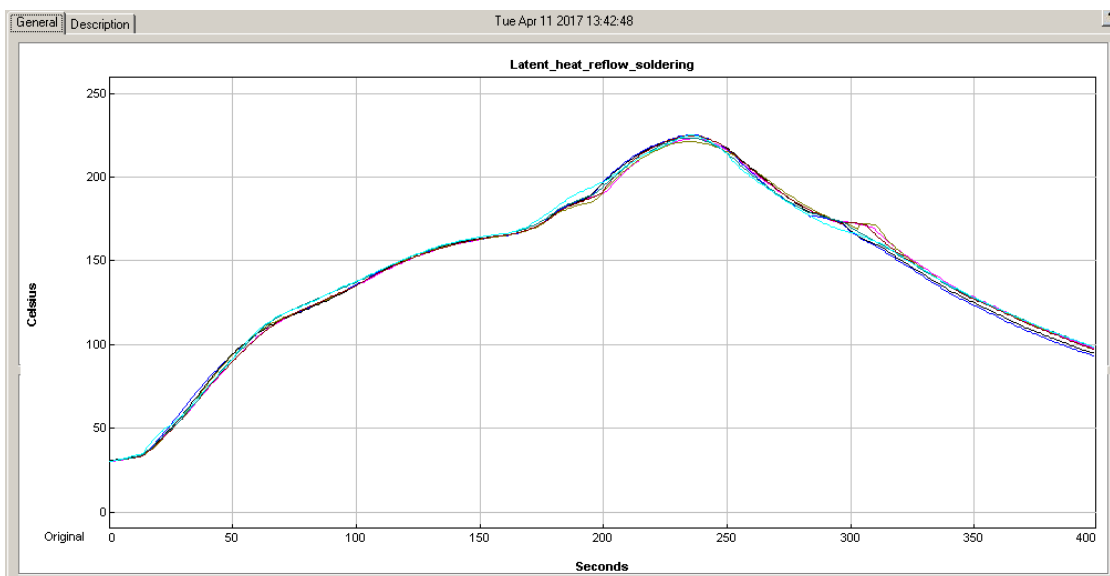
10.1.19 Teplotní profil Sn37Pb, všechny pájené plošky se slitinou, 4. přetavení



10.1.20 Teplotní profil Sn37Pb, všechny pájené plošky se slitinou, 6. přetavení

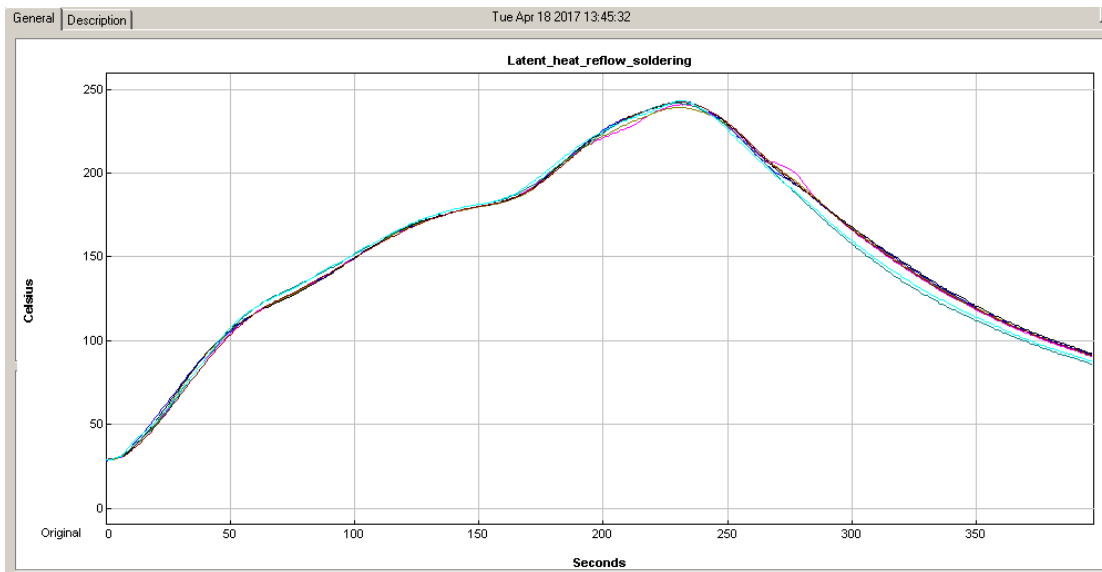


10.1.21 Teplotní profil Sn37Pb, všechny pájené plošky se slitinou, 9. přetavení

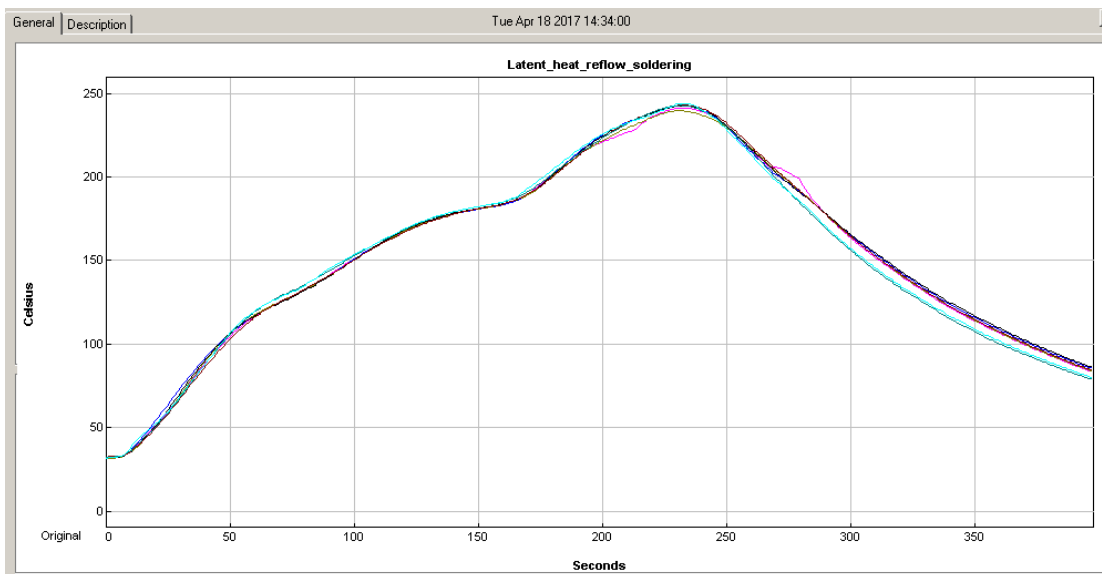


10.3 Přílohy slitiny SAC387

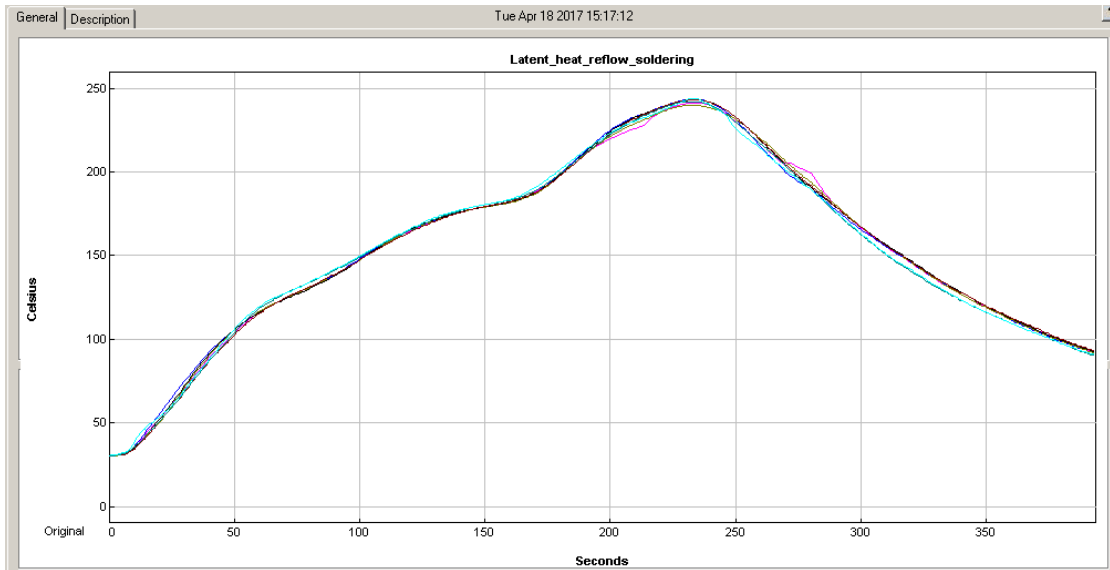
10.3.1 Teplotní profil SAC387, pájená ploška 1 se slitinou, 1. přetavení



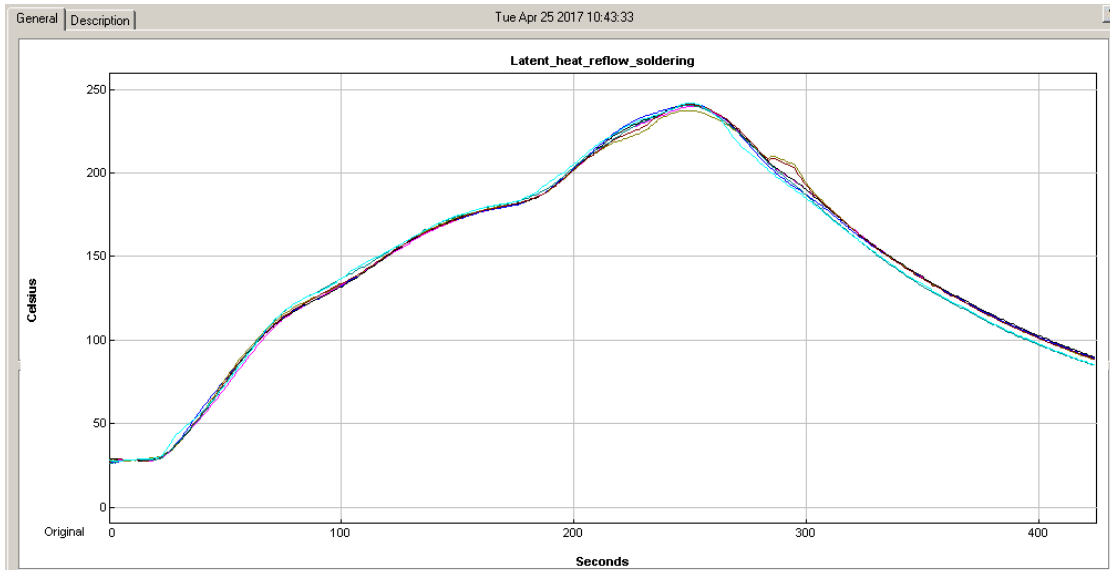
10.3.2 Teplotní profil SAC387, pájená ploška 1 se slitinou, 4. přetavení



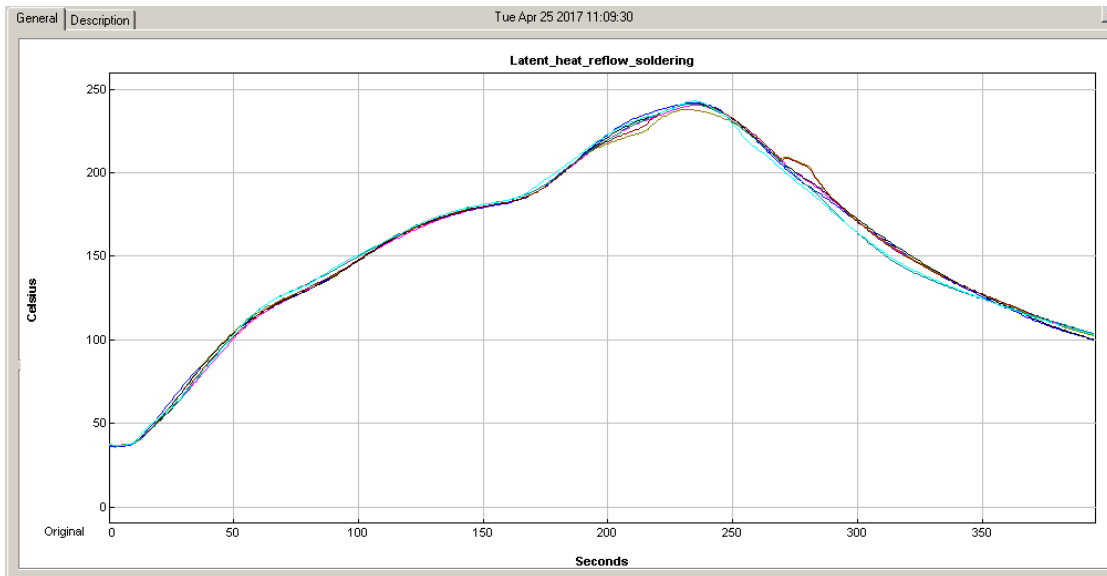
10.3.3 Teplotní profil SAC387, pájená ploška 1 se slitinou, 7. přetavení



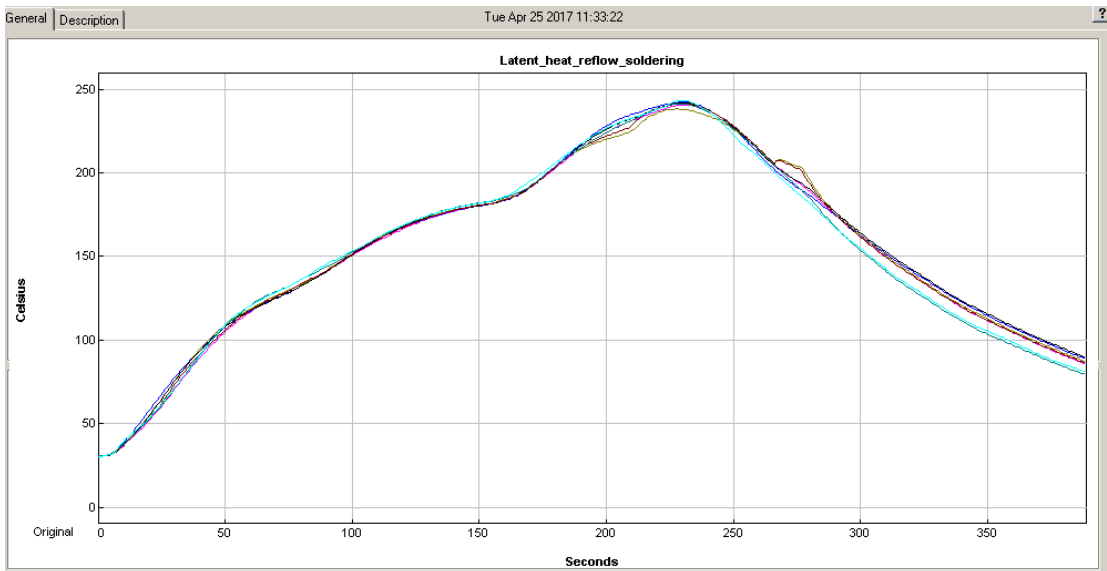
10.3.4 Teplotní profil SAC387, pájené plošky 3 a 5 se slitinou, 1. přetavení



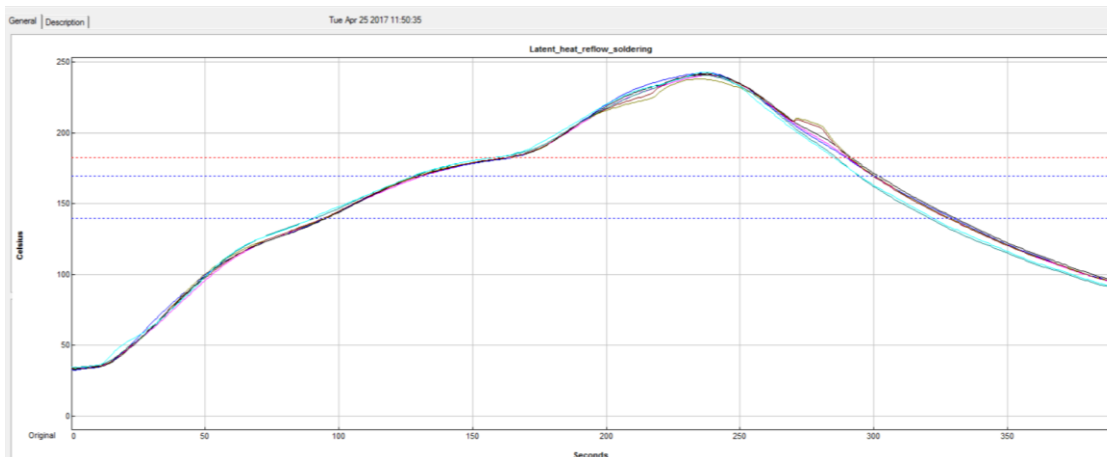
10.3.5 Teplotní profil SAC387, pájené plošky 3 a 5 se slitinou, 3. přetavení



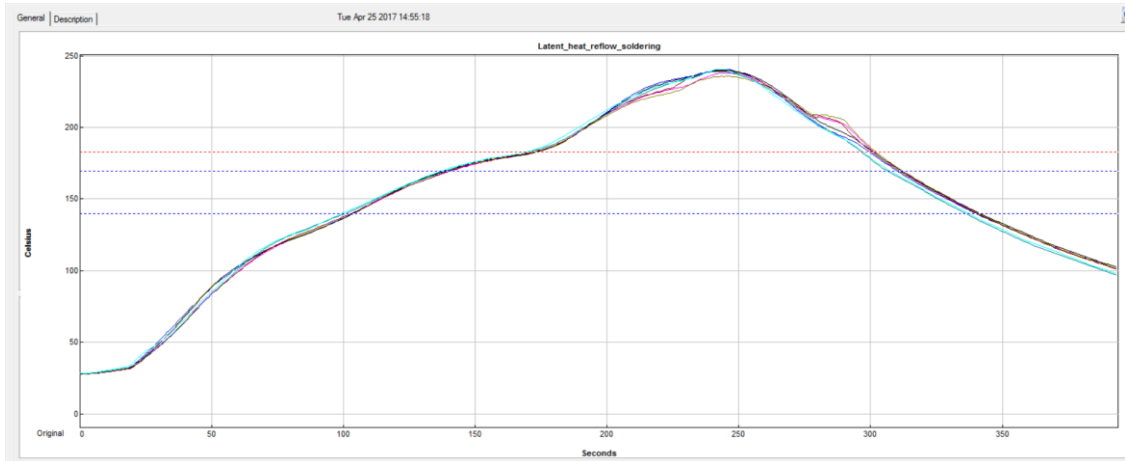
10.3.6 Teplotní profil SAC387, pájené plošky 3 a 5 se slitinou, 5. přetavení



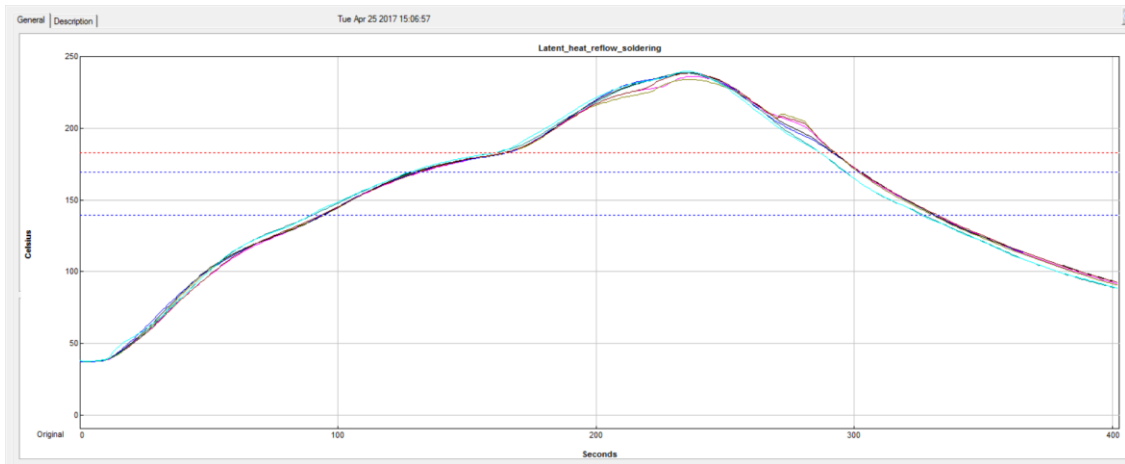
10.3.7 Teplotní profil SAC387, pájené plošky 3 a 5 se slitinou, 6. přetavení



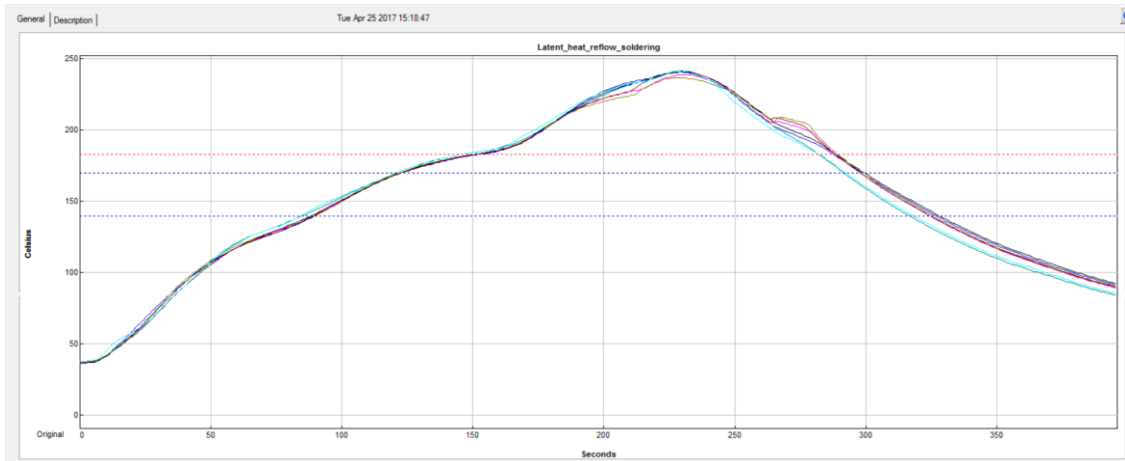
10.3.8 Teplotní profil SAC387, pájené plošky 1, 3 a 5 se slitinou, 1. přetavení



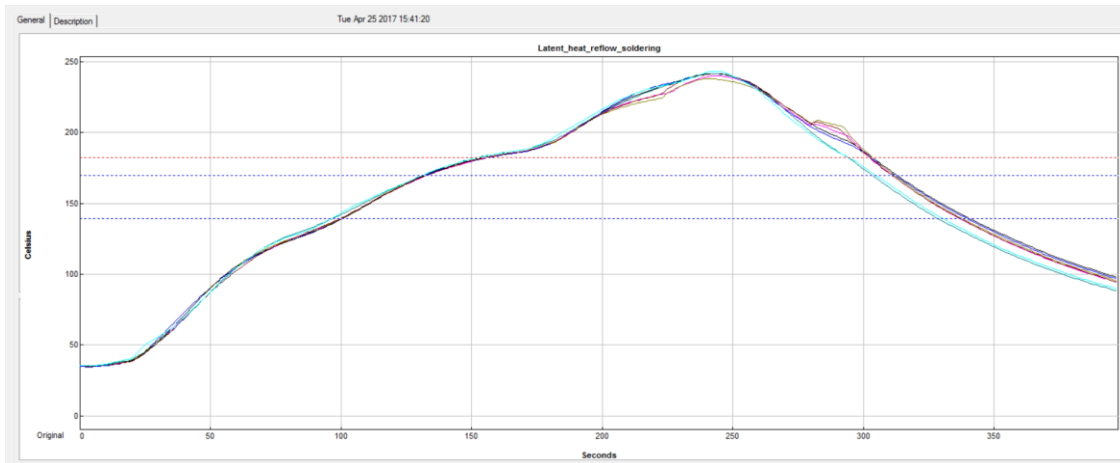
10.3.9 Teplotní profil SAC387, pájené plošky 1, 3 a 5 se slitinou, 2. přetavení



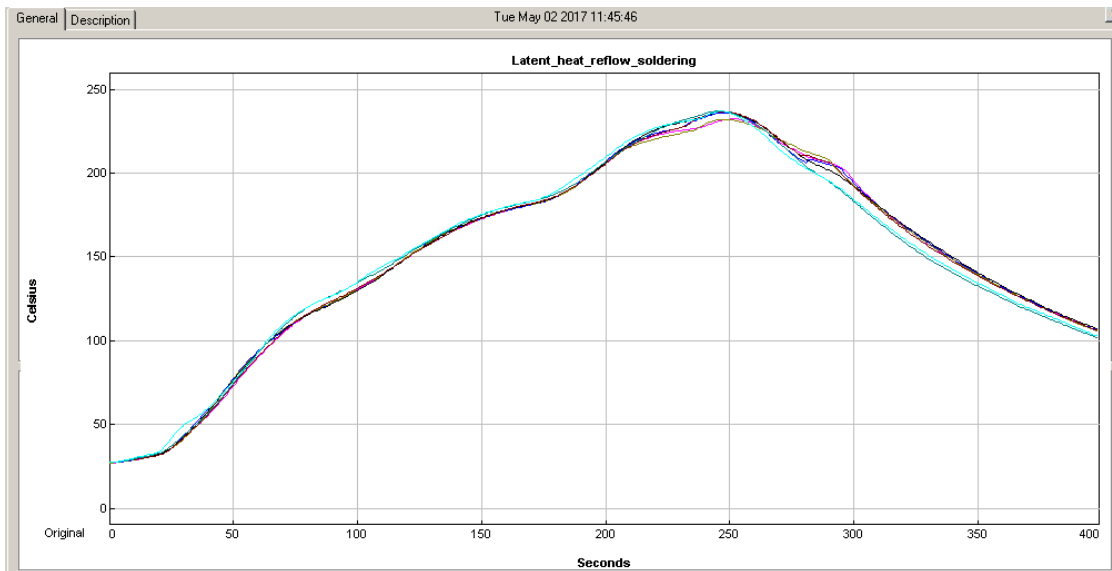
10.3.10 Teplotní profil SAC387, pájené plošky 1, 3 a 5 se slitinou, 3. přetavení



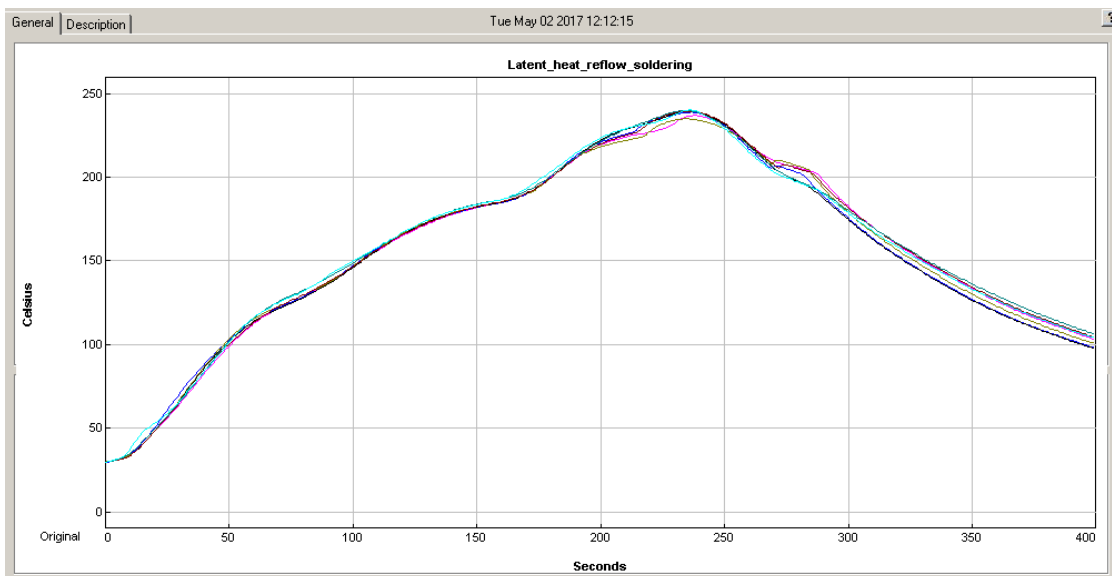
10.3.11 Teplotní profil SAC387, pájené plošky 1, 3 a 5 se slitinou, 5. přetavení



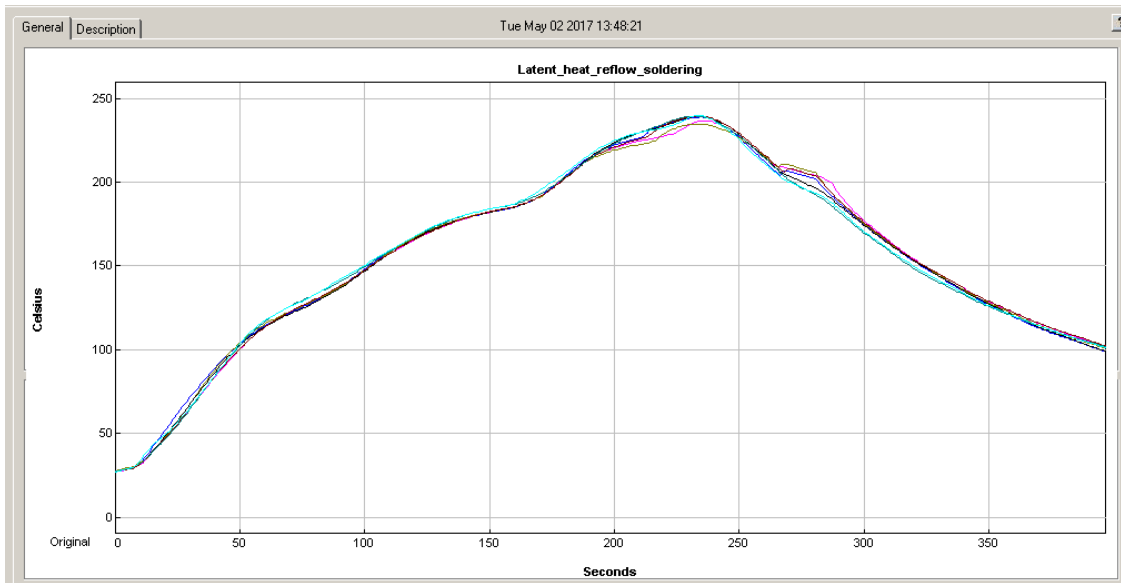
10.3.12 Teplotní profil SAC387, pájené plošky 1, 2, 3, 5 a 7 se slitinou, 1. přetavení



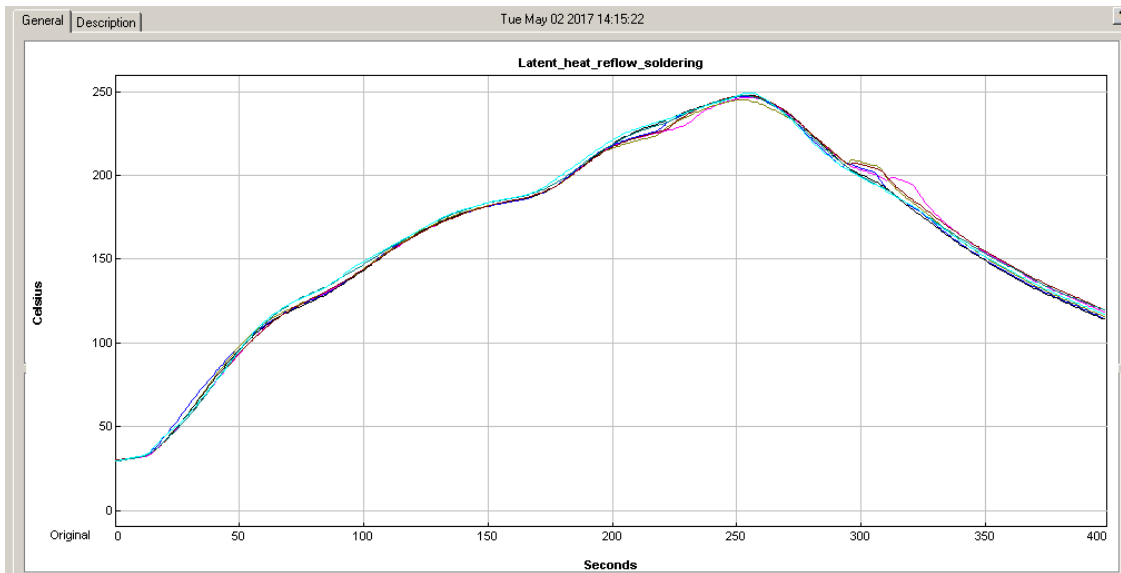
10.3.13 Teplotní profil SAC387, pájené plošky 1, 2, 3, 5 a 7 se slitinou, 3. přetavení



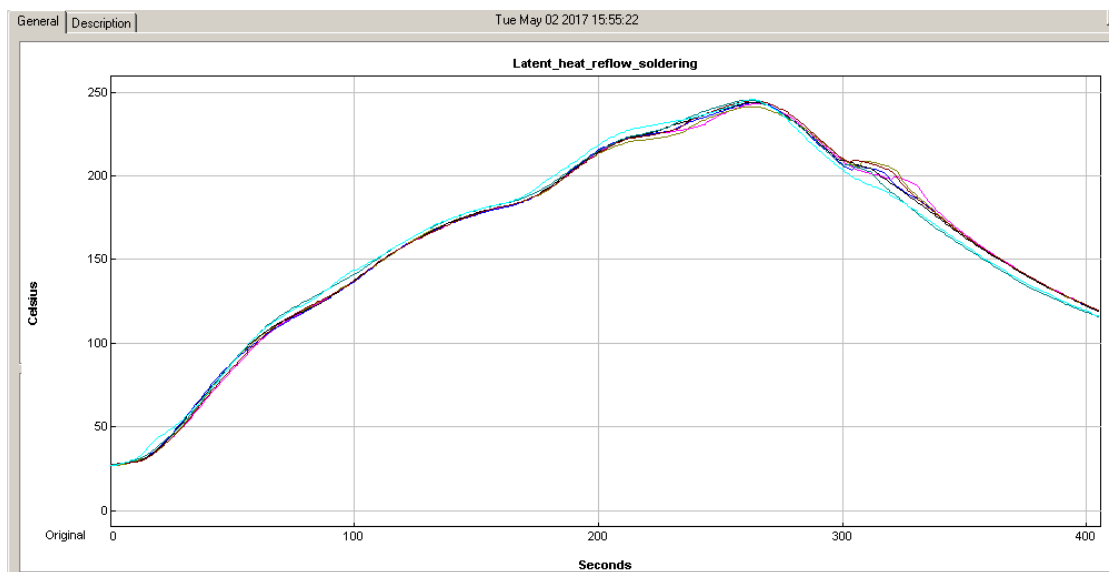
10.3.14 Teplotní profil SAC387, pájené plošky 1, 2, 3, 5 a 7 se slitinou, 5. přetavení



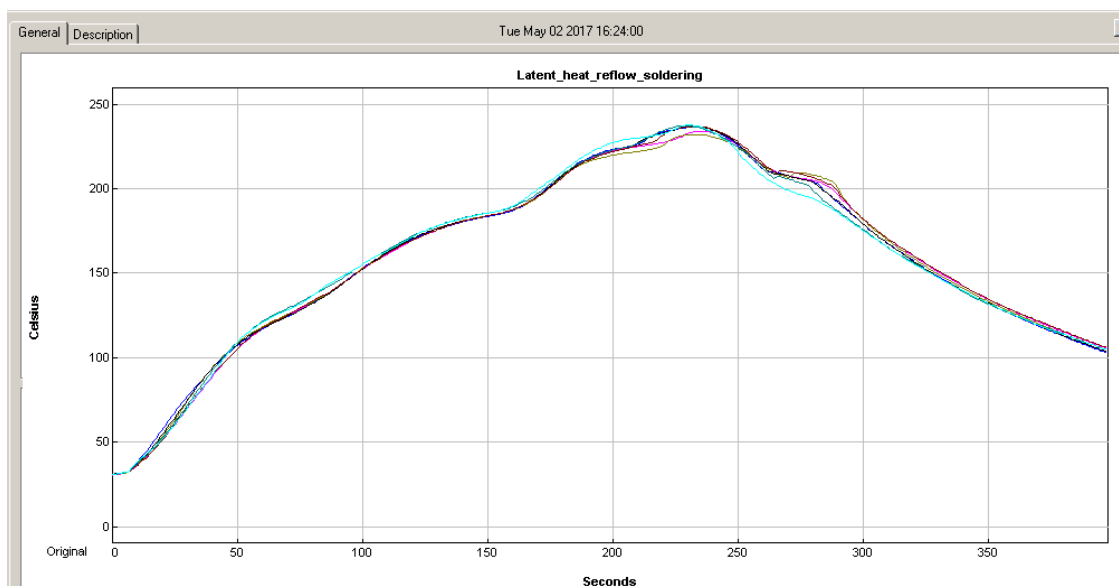
10.3.15 Teplotní profil SAC387, pájené plošky 1, 2, 3, 5 a 7 se slitinou, 7. přetavení



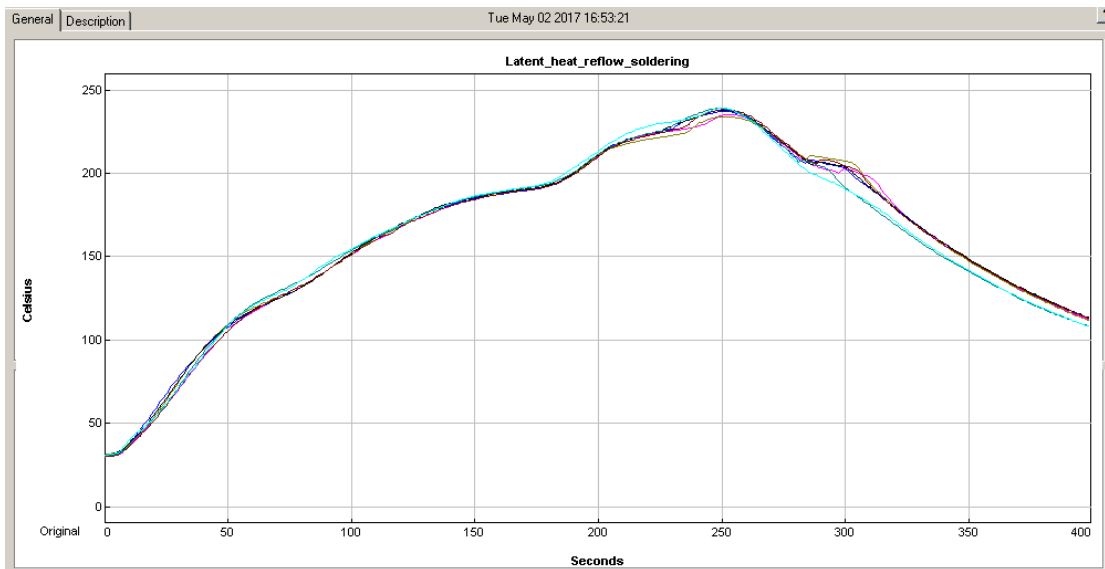
10.3.16 Teplotní profil SAC387, všechny pájené plošky se slitinou, 1. přetavení



10.3.17 Teplotní profil SAC387, všechny pájené plošky se slitinou, 3. přetavení



10.3.18 Teplotní profil SAC387, všechny pájené plošky se slitinou, 6. přetavení



10.3.19 Teplotní profil SAC387, všechny pájené plošky se slitinou, 8. přetavení

