



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Teplotní profil, růst intermetalických vrstev

Temperature profile, growth of intermetallic layers

Autor práce: Ondřej Renza
Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika
Akademický rok: 2017/2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Renza** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **420179**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Teplotní profil, růst intermetalických vrstev

Název bakalářské práce anglicky:

Temperature profile, growth of intermetallic layers

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií pájení přetavením, intermetalickými sloučeninami a teplotním profilem.
- 2) Vytvořte vzorky s různými pájecími slitinami s ohledem na teplotní profil, respektive s ohledem na tzv. 'heating factor'.
- 3) U vzorku proveďte změření tloušťky intermetalických vrstev na rozhraní pájený spoj/pájecí ploška.
- 4) Výsledky experimentů vyhodnoťte s ohledem na použitý teplotní profil.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice 2005, ISBN 80-903597-0-1
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [3] URBÁNEK J., KLABAČKA E.: Technologie elektronických zařízení, ČVUT Praha, 1997
- [4] Pietriková A., Ďurišín J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **04.09.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce:
do konce zimního semestru 2018/2019

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis 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

.....

Ondřej Renza

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za vedení a pomoc při řešení této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Davidovi Buškovi, Ph.D. za pomoc s přípravou vzorků a Ing. Martinovi Plačkovi za zalití vzorků do vodivé pryskyřice a jejich následné vybroušení a vyleštění.

Také bych chtěl poděkovat mé rodině, přátelům a mé snoubence za podporu po celou dobu studia.

Ondřej Renza

Anotace:

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem integrálu teploty a času pájení na růst intermetalických vrstev. Teoretická část popisuje různé technologie pájení, teplotní profil pece, heating factor a intermetalické sloučeniny. Praktická část popisuje postup experimentu, který se zaměřuje na vliv přetavovacího pájecího profilu na tloušťku intermetalické vrstvy.

Klíčová slova:

Integrál teploty a času pájení, teplotní profil, růst intermetalických vrstev, pájení, DPS (deska plošného spoje).

Abstract:

This bachelor thesis deal with heating factor on growth of intermetallic layers. The theoretical part describes different soldering technologies, temperature profile, heating factor and intermetallic compounds. The practical part describes process of experiment which focuses on effect of reflow soldering profile on thickness of intermetallic layers.

Key words:

Heating factor, temperature profile, growth of intermetallic layers, soldering, PCB (printed circuit board).

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých symbolů a zkratek.....	8
Úvod.....	9
1. Pájení.....	10
1.1 Metody pájení.....	10
1.1.1 Ruční pájení.....	11
1.1.2 Pájení přetavením	12
1.1.3 Pájení vlnou.....	17
1.1.4 Pájení ponorem.....	18
1.1.5 Pájení vlečením	18
1.2 Pájecí slitiny	19
1.2.1 Olovnaté pájecí slitiny	19
1.2.2 Bezolovnaté pájecí slitiny	19
1.3 Tavidla.....	20
1.3.1 Dělení tavidel.....	20
1.3.2 Dělení podle normy MIL-F-14256	21
1.3.3 Dělení podle normy ČSN EN ISO 9454-1	21
1.3.4 Dělení podle normy ČSN EN 61190-1-1:2002	22
2. Teplotní profil přetavovací pece	22
2.1 Oblast předeřevu.....	23
2.2 Oblast teplotního vyrovnání	23
2.3 Oblast přetavení.....	23
2.4 Oblast chlazení	23
3. Heating factor	24
4. Intermetalické vrstvy (IML – Intermetallic layer).....	26
4.1 Vlastnosti intermetalických sloučenin	26
4.2 Vznik IML.....	27
4.3 Stárnutí IML.....	28

4.4	Porovnání IML bezolovnaté pájky vůči olovnaté	28
5.	Experimentální část	29
5.1	Použité materiály a přístroje	29
5.1.1	Pájecí pasty	29
5.1.2	Testovací vzorky	29
5.1.3	Aparatura pro šablonový tisk	30
5.1.4	Přetavovací tunelová pec Mistral 260	30
5.1.5	Profilometr KIC Explorer	31
5.1.6	Binokulární lupa Vision HAWK DUO QC-5000	31
5.1.7	Pájecí sestava JBC DD 2A	32
5.2	Teplotní profil	33
5.3	Postup experimentu	33
5.3.1	Přípravek pro měření teplotních profilů	33
5.3.2	Nastavování teplotních profilů	34
5.3.3	Tisk DPS	36
5.3.4	Tvorba vzorků pro pozorování IML	37
5.3.5	Mikroskopie	38
5.4	Měření tloušťek IML pomocí programu GIMP	39
5.4.1	Vyznačení oblasti IML	40
5.4.2	Přepoččet z pixelů na jednotku délky	41
5.4.3	Určení tloušťky IML	41
5.5	Naměřené údaje	42
6.	Závěr	44
7.	Seznam literatury a informačních zdrojů	45
8.	Seznam obrázků	48
9.	Seznam tabulek	49

Seznam použitých symbolů a zkratek

DPS	Deska plošného spoje
RoHS	Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment
IML	Intermetallic layer – intermetalická vrstva
IMC	Intermetallic compound – intermetalická sloučenina
SAC	Bezolovnatá pájka Sn-Ag-Cu
IR	Infračervené záření
SMD	Surface mount device – součástky pro povrchovou montáž
THD	Through-hole device – vývodové součástky
OSP	Organic surface protectives – chemicky nanesené organické inhibitory oxidace mědi na měděný povrch tištěného spoje

Úvod

Tato práce se zabývá vlivem teplotních profilů na růst intermetalických vrstev. Jejich vznik ve spoji je důležitý, protože tvoří mechanické a elektrické spojení pájených materiálů. Na vznik těchto vrstev má vliv mnoho faktorů, jako jsou materiálové vlivy (povrchová úprava pájecích plošek, drsnost povrchu, prvkové složení pájecích past) a procesní vlivy (nastavení teplotního pájecího profilu, množství pájecí pasty ve spoji apod.).

Dne 8. června 2011 byla vydána směrnice RoHS (Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment) o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních. Mezi tyto látky patří také olovo. Z tohoto důvodu se výrobci snaží vyvinout pájecí slitinu, která by se svými vlastnostmi přiblížila dříve nejpoužívanější eutektické Sn-Pb pájce. V experimentální části se proto zaměřuji na bezolovnaté pájecí slitiny.

Experimentální část popisuje vznik intermetalických vrstev v závislosti na teplotním pájecím profilu (příp. heating factoru) pro pájení přetavením. Tloušťka intermetalických vrstev byla zkoumána pro tři teplotní pájecí profily, dvě pájecí pasty se složením slitiny SnAgCu s různým typem tavidla. Pasta byla vždy přetavena na měděných pájecích ploškách s následným vyhodnocením tloušťky intermetalických vrstev pomocí výbrusů a mikroskopie.

Po dohodě s konzultantem jsem se kromě jiného zaměřil také na vliv použitého tavidla na růst intermetalických vrstev. Nejsm si vědom, že by tato problematika byla již zkoumána. Použité pájecí pasty pro experiment se svým složením liší pouze v tavidle, a proto jsou ideální k pozorování této problematiky. Konkrétně se liší pouze v aktivaci halogenidy.

1. Pájení

Pájení je způsob spojování materiálů, kde se taví a následně tuhne pájecí slitina. Její teplota tání je vždy nižší, než teplota tání spojovaných materiálů. Pájený spoj vzniká na rozhraní mezi pájkou a pájeným předmětem.

Podle teploty tavení pájky rozlišujeme pájení měkké (do 450°C) a tvrdé (nad 450°C). Tvrdé pájení se používá především ke spojování mechanických částí, jako jsou např. přístrojové skříně, kontaktní pružiny, apod. Naopak měkké pájení je naprosto převažujícím způsobem při montáži elektronických zařízení. [2, 13]

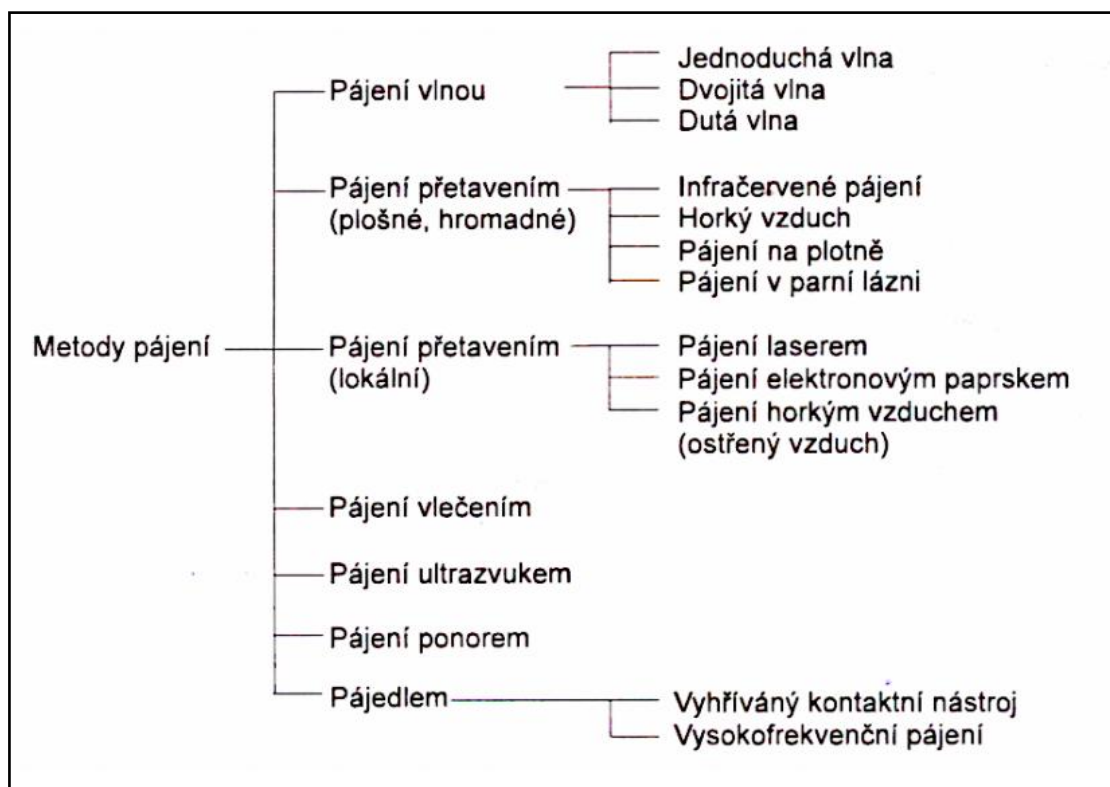
Při pájení dochází k difúzi atomů pájky do pájeného materiálu a naopak. Podle doby pájení spoje pak může vzniknout pájený spoj bezdifúzní, difúzní s rozpouštěním a disperzní.

Bezdifúzní pájený spoj vzniká při krátkém ohřevu ve stádiu tvorby chemických vazeb. Difúze ve spoji je zanedbatelná.

Difúzní pájený spoj s rozpouštěním vzniká při delším ohřevu (smáčení), kdy probíhá difúze a zároveň rozpouštění.

Disperzní pájený spoj vzniká u kovů, které vzájemně netvoří slitiny. Při pájení vtéká roztavený materiál do mikroskopických kapilár v tuhém tělese, čímž se vytvoří pevný spoj.[2]

1.1 Metody pájení



Obr. 1: Metody pájení [1]

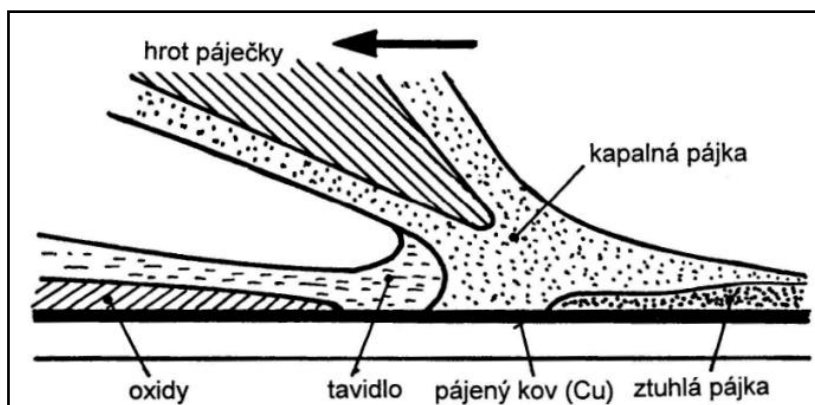
V elektrotechnickém průmyslu se používá mnoho pájecích technik. Jednotlivé metody pájení se liší podle způsobu, jakým je pájka přiváděna do spoje a typem přenosu tepla. Při pájení vlnou, vlečením a ponorem se tekutá pájka přivádí do místa spoje z pájecí lázně. U pájení přetavením a ultrazvukem se pájka na spoj dodá před pájením ve formě pájecí pasty.

Mezi nejpoužívanější patří ruční pájení, pájení vlnou a pájení přetavením. [1]

1.1.1 Ruční pájení

Ruční pájení je vzhledem k přítomnému lidskému faktoru poměrně nespolehlivé. Je nemožné, aby pracovník dokázal přesně opakovat všechny úkony, které jsou důležité pro kvalitu spoje (doba pájení, tepelné zatížení spoje, množství pájky ve spoji).

Pro ruční pájení se používá ruční páječky s regulací a stabilizací teploty, vybavené vhodným pájecím hrotem. Na pájecím hrotu se po celou dobu pájení musí udržovat tenká lesklá vrstva pájky, aby byl zaručený řádný přenos tepla do spoje. Tavidlo je nanášeno buď před ohřevem spoje, nebo se uvolní při samotném ohřevu z dutiny v trubičce pájky. Pájený spoj musí být pomocí pájecího hrotu dostatečně prohřátý, aby se pájka při dotyku tavila a smáčela pájené povrchy. Po připájení spoje musí být hrot páječky včas oddálen, aby nedošlo vlivem nadměrného zahřívání ke vzniku nekvalitního a nespolehlivého spoje, nebo dokonce i k poškození okolních součástí. Při tuhnutí pájky je nutné zabránit jakémukoliv pohybu pájených částí. Tuhnutí musí probíhat v přirozeném prostředí bez ochlazování proudem vzduchu, nebo kapaliny.



Obr. 2: Tvorba ručně pájeného spoje [13]

Ruční pájení je určeno pouze pro vývojovou a kusovou výrobu, protože z hlediska lidského faktoru nelze dodržet stálé podmínky pájení. Pro sériovou výrobu se používá strojní pájení, které poskytuje standardizované podmínky pro tvorbu pájených spojů. Zajišťuje vysokou výtěžnost a minimální chybovost. [2]

1.1.2 Pájení přetavením

Pájení přetavením je jedním z typů pájení používaných pro hromadnou výrobu. Od ostatních metod pájení se liší tím, že se jako první nanese pájecí pasta na místa, která mají být pájena. Pájecí pasta se nanáší sítotiskem, šablonovým tiskem nebo dispenserem (vytlačování pájecí pasty dutým hrotem). Po nanesení pasty následuje osazení DPS (deska plošného spoje) součástkami osazovacím automatem a nakonec dojde k samotnému přetavení pájecí pasty.

Tato metoda omezuje možnost tvorby můstků mezi sousedními spoji a tím umožňuje dosažení maximální hustoty osazení.

Přetavení pájecí pasty se dá provést ohřevem infračervenými zářiči, laserem, vedením tepla, horkým plynem nebo ohřevem kondenzací par. [13, 23]

Pájení konvekcí

Pájení konvekcí patří mezi základní metodu přetavení v průmyslu. Pro tento způsob pájení se užívá průběžných pecí, kde se pájí v normální, nebo dusíkové atmosféře.

Je důležité, aby byla DPS rovnoměrně nahřívána z obou stran, což zabrání nežádoucím jevům uvnitř DPS (pnutí) nebo na povrchu (pokud by DPS nebyla nahřívána ze spodu, hůře by se vytvářel spoj přetavením na horní straně DPS).

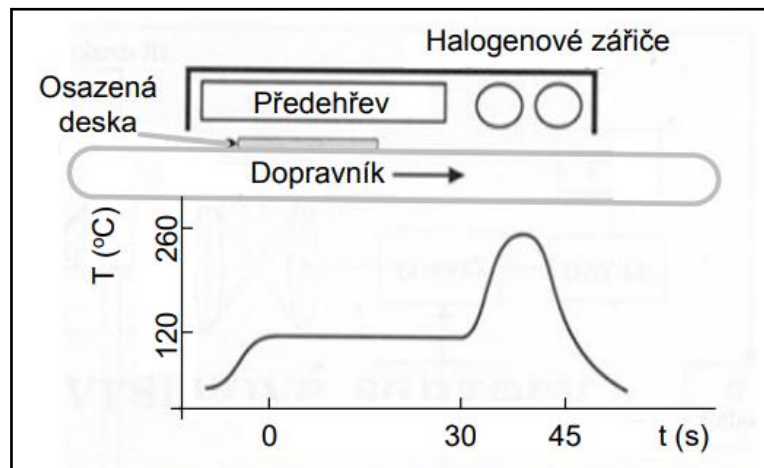
Většina pecí pro bezolovnatou výrobu funguje v normální vzduchové atmosféře. Ve speciálních aplikacích se používá během procesu přetavení ochranné atmosféry (používání dusíku). [27]



Obr. 3: Dusíková přetavovací pec [27]

Pájení ohřevem infračervenými zářiči

Pro ohřev se užívá IR zářičů, které generují záření o vlnové délce $\lambda = 0,8 - 400 \mu\text{m}$. Část záření se od materiálu odrazí a část je pohlcena. Protože koeficient odrazu i koeficient absorpce jsou funkcí mnoha faktorů (barva povrchu, drsnost, směr dopadajícího záření apod.), dochází k nerovnoměrnému ohřevu povrchu, což může vést k různé kvalitě pájených spojů. [23]



Obr. 4: Pájení ohřevem IR zářiči [23]

Pájení laserem

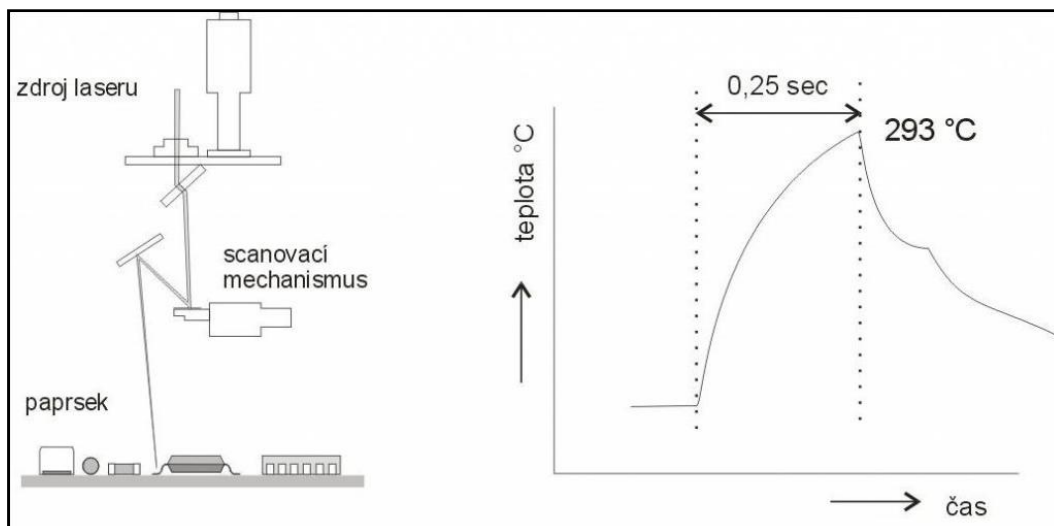
Pájení pomocí laseru se používá hlavně pro montáž součástek, které není možné připájet vlnou nebo jinou metodou pájení přetavením, než je pájení laserem. Velkou výhodou je velmi přesné lokální přetavení. Je vhodné k pájení tepelně citlivých materiálů.

Existují dva typy laserů. Pulsní (YAG) a plynový (CO₂).

Pulsní laser generuje impulsní laserový paprsek o vlnové délce $1,06 \mu\text{m}$, který proniká sklem a většinou plastických hmot a je přijatelně absorbován kovy.

Plynový laser generuje laserový paprsek o vlnové délce $10 \mu\text{m}$. Tato vlnová délka je dobře pohlcována plasty a hůře kovy, což může mít za důsledek zničení plastových částí na DPS, pokud nejsou učiněna zvláštní opatření. CO₂ laser má podstatně vyšší účinnost (až 15%) než pulsní laser (1%).

Pájení laserem se někdy spojuje s ultrazvukovými vibracemi pájecí hlavy, což zlepšuje odstranění kyslíčků z pájených povrchů a dosahuje se vysoké kvality spojů. [23, 24]



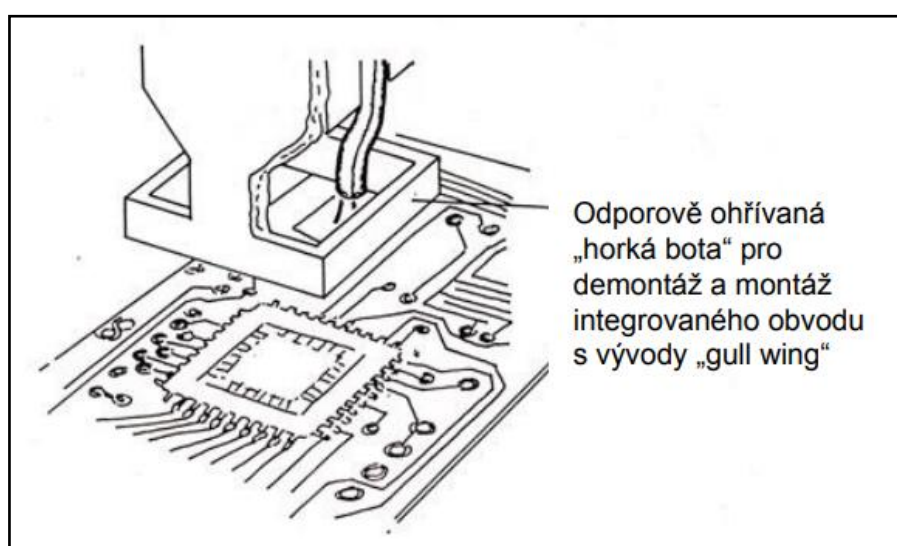
Obr. 5: Pájení laserem [24]

Pájení ohřevem vedením tepla

Tohoto typu pájení je používáno u ručních páječek, užívaných při ruční výrobě.

Pro některé speciální technologie se používá ultrazvukové pájení, kde je roztavená pájka rozkmitávána sonotrodou. Výsledkem je kvalitní pájení bez tavidla a možnost spojování materiálů, které není možné jiným způsobem pájení spojit (pájení na sklo). U této technologie se užívá speciálních typů pájek. [23]

Při opravách SMD (Surface mount device – součástky pro povrchovou montáž), konkrétně pro výměnu integrovaných obvodů se používá pájení horkou botou. Příklad tohoto pájecího zařízení je na následujícím obrázku.



Obr. 6: Jednoučelové pájecí zařízení pro montáž integrovaných obvodů [23]

Lokální pájení horkým vzduchem (ostřený vzduch)

Lokální pájení horkým vzduchem se využívá při pájení malého rozsahu (např. při opravách DPS). Jako plynu se nejčastěji používá vzduch. Při hrozbě nežádoucí oxidace se používá inertní plyn.

Pájený spoj je zahříván proudem horkého plynu z ohřivací hlavy zakončené úzkou trubičkou (průměr cca 1 mm). Tlak plynu, vycházejícího z ohřivací hlavy, musí být regulován tak, aby nedocházelo k odfukování součástek. [23]

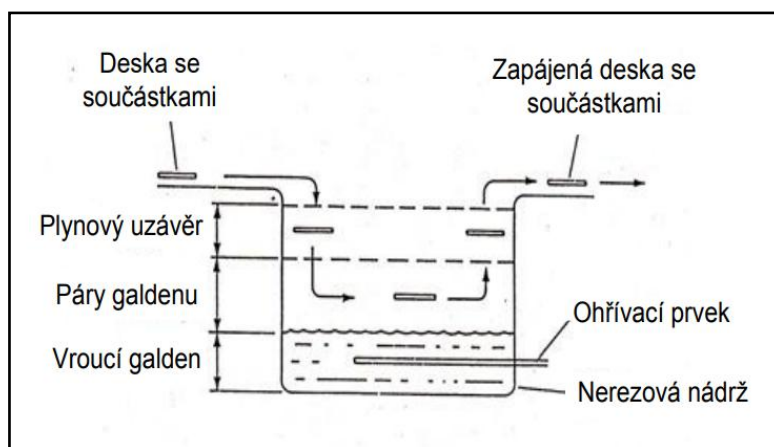


Obr. 7: Horkovzdušná stanice JBC JT-2D [25]

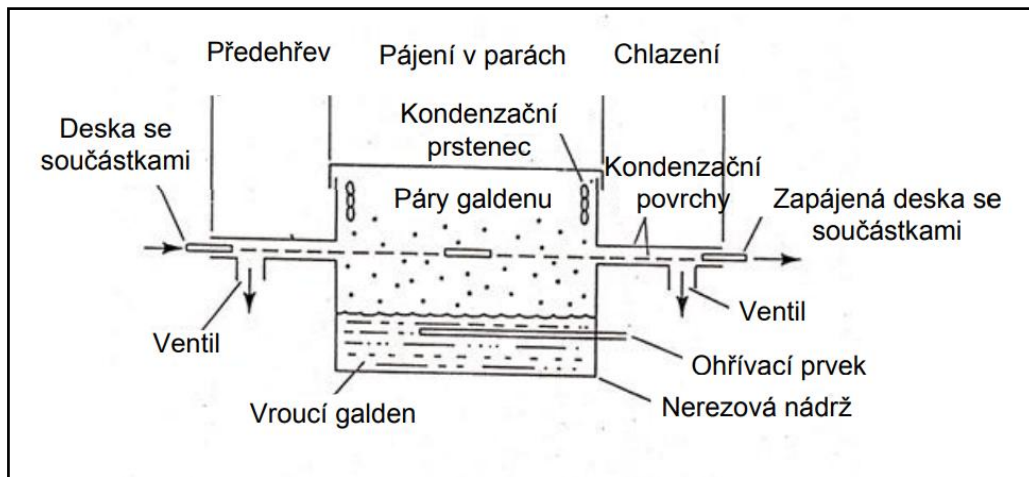
Pájení v parách

Při pájení v parách je DPS ohřívána kondenzačním teplem pracovní kapaliny. DPS se součástkami se umístí do prostoru v zařízení pro pájení v parách, kde se nachází páry pracovní kapaliny (řada dielektrických kapalin s bodem varu 55 – 270 °C, někdy nazývaná též galden). Páry DPS ohřívají, kondenzují na ní a způsobí zapájení spojů. Zkondenzovaná kapalina skapává do dolní části pájecího zařízení, kde je znovu uváděna do varu.

Výhodou této technologie, oproti pájení infračervenými zářiči, je rovnoměrná teplota ohřevu desky. Pájení v parách se provádí v dávkách, nebo kontinuálně. [23]



Obr. 8: Zařízení pro pájení v parách (v dávkách) [23]



Obr. 9: Zařízení pro pájení v parách (kontinuální) [23]

Vlastnosti kapalin pro pájení v parách:

- vysoký bod vzplanutí,
- netečnost,
- chemická a tepelná stabilita,
- definovaný bod varu,
- hustota páry vyšší než hustota vzduchu.

Nevýhody pájení v parách:

- k dispozici jen některé pájecí teploty,
- nezbytná dobrá pájitelnost,
- ne všechny materiály (zvláště plasty) snesou kombinaci času a teploty při pájení,
- kapalina je drahá,
- během pájecího procesu dochází ke ztrátám kapaliny.

Výhody pájení v parách:

- proces hromadného pájení,
- poměrně rychlý ohřev,
- rovnoměrné zahřívání,
- rovnoměrné rozložení teplota v pájecí zóně,
- ohřev je nezávislý na geometrii pájených prvků,
- je možno pájet součástky značně se lišící svou hmotností,
- nemůže dojít k překročení maximální teploty,
- je-li materiál správně zvolen, nemůže dojít k poškození teplem,
- v zóně pájení nedochází k oxidaci (páry vytlačují ze zóny pájení kyslík),
- je možno používat slabší tavidla,
- je možno používat tavidlo s nízkým obsahem pevných látek. [24]

1.1.3 Pájení vlnou

Pájení vlnou bylo vynalezeno v roce 1955 v Anglii. Zpracovávají se DPS jednovrstvé, vícevrstvé a ohebné.

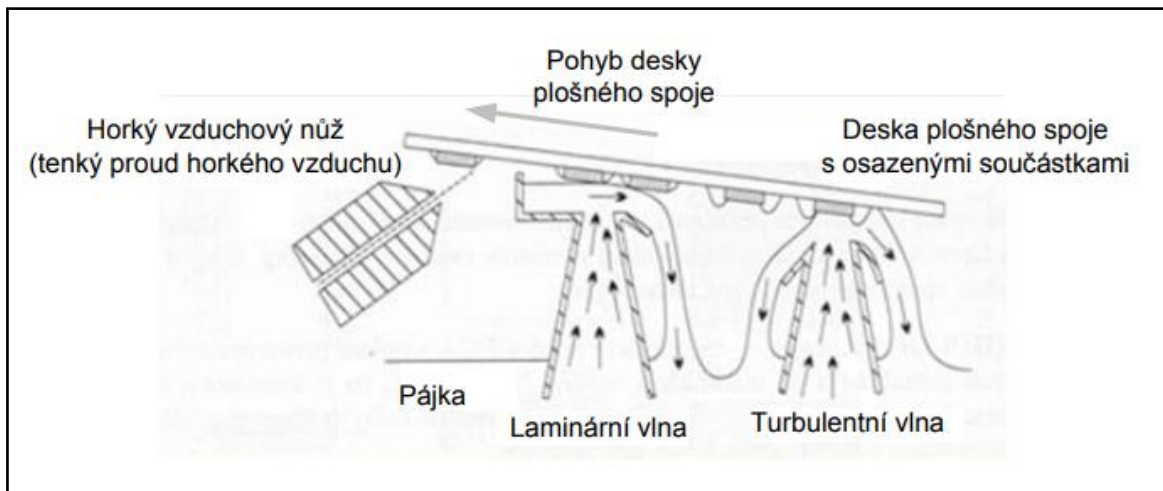
Při pájení vlnou se roztavená pájecí slitina nachází v kontejneru, ve kterém je vytvořena systémem trysek a čerpadla vlna, respektive vlny. DPS s osazenými součástkami prochází nad těmito vlnami a tím jsou plochy určené k zapájení pájeny. Zbylá plocha, která není určená k pájení, je pokrytá nepájevou ochrannou vrstvou. Před vstupem DPS do vlny je na DPS nanášeno tavidlo, které čistí povrch pájených součástí.

Při pájení vlnou jsou součástky na spodní straně DPS na několik vteřin v kontaktu s roztavenou pájkou, která má teplotu 140 – 160 °C. Z tohoto důvodu není možné pájet některé typy součástek, které by mohly být poškozeny.

DPS jsou osazovány THD (Through-hole device – vývodové součástky) součástkami, nebo SMD součástkami. SMD součástky se k DPS před pájením připěvňují pomocí lepidla. Tyto lepidla musí splňovat následující požadavky:

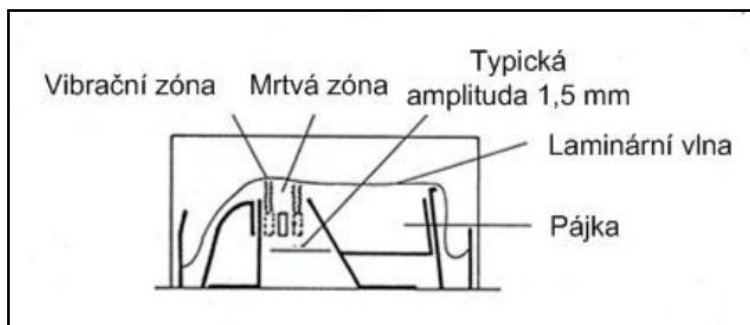
- malá roztékavost,
- dobrá adheze k desce a součástce,
- musí zajišťovat dostatečnou pevnost spoje,
- nesmí měknout s teplotou,
- nesmí chemicky ovlivňovat desku ani součástku,
- musí být netoxická,
- nesmí být elektricky vodivá.

Pro pájení vlnou se většinou užívá dvou vln, kde první je turbulentní (podporuje funkci tavidla a dokonale očišťuje povrchy určené k pájení) a druhá laminární (dokonalé homogenní vytvoření spoje). U některých spojů se mohou vlivem pájení vlnou tvořit „krápníky“. Ty se odstraní pomocí proudu horkého vzduchu (teplota až 380 °C), vycházejícího z „horkého nože“, sloužícího k odstranění přebytečné pájky. [23, 24]



Obr. 10: Pájení vlnou [23]

Tam, kde je potřeba odstranění stínění, které může nastat při laminární vlně, se užívá pájení omega vlnou. Tato vlna je ve dvou zónách rozkmitávána sonotrodami s kmitočtem 50 Hz, urychluje odchod zachycení molekul plynu, a tím homogenizuje pájku v oblasti pájení, čímž zlepšuje pájitelnost spojů. [23]



Obr. 11: Pájení Omega vlnou [23]

1.1.4 Pájení ponorem

U pájení ponorem se DPS ponoří do roztavené slitiny. Tento způsob pájení se používá spíše na vzorkové série. Výrobců v této oblasti pájení je velmi málo. Většinou se jedná o prototypy, nebo velmi malé série. [24]

1.1.5 Pájení vlečením

Při pájení vlečením je DPS s osazenými součástkami vlečena po klidné hladině roztavené pájky. Roztavená pájka je uváděna do velmi pomalého toku, dopravník jde rovnoběžně s hladinou slitiny. Tento způsob pájení je stejně jako způsob pájení ponorem velmi ojedinělý. [24]

1.2 Pájecí slitiny

Díky směrnici RoHS (Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment) o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních, mezi které patří také olovo, jsou v současné době olovnaté pájky široce nahrazovány bezolovnatými.

Pájecí slitiny dělíme na olovnaté pájecí slitiny a bezolovnaté pájecí slitiny. [12,15]

1.2.1 Olovnaté pájecí slitiny

Nejpoužívanější jsou dvousložkové, používají se ale i třísložkové. Složení dvousložkové olovnaté pájky se pohybuje od Sn60%Pb40% do Sn65%Pb35%. Nejnižší teplotu tání má eutektická slitina Sn63%Pb37%. Tato pájka se taví při 183°C. Během tuhnutí přechází ihned z kapalného skupenství do pevného. Tvoří jemnozrnnou krystalickou strukturu s dobrými mechanickými a elektrickými vlastnostmi. [12]

V dnešní době se olovnaté pájky používají tam, kde jsou vysoké nároky na bezpečnost, v letectví, automobilovém průmyslu, vesmírné technologii atd. Kromě olova a cínu obsahuje také další kovy (příměsi), které jsou většinou nežádoucí a negativně ovlivňují dané vlastnosti slitiny. Příměsi ale mohou pájku ovlivňovat i pozitivně (bismut, stříbro). Následující tabulka obsahuje vliv různých příměsí na vlastnosti pájky. [12, 15]

Tab. 1: Vliv příměsí na vlastnosti pájky [15]

Příměsi	Vliv na vlastnosti pájky
Měď	hrubožrnost tvrdost a křehkost špatná roztékavost
Kadmium	křehký a porézní pájený spoj zrnková struktura
Železo	zrnková struktura
Hliník, zinek	špatná roztékavost porézní pájený spoj
Zlato	zrnitá pájka
Arsen, nikl	vznik útvarů, podobných puchýřkům
Bismut	snížení teploty tání
Stříbro	snížení schopnosti rozpouštět jiné kovy povrch pájeného spoje je matný a tmavý

1.2.2 Bezolovnaté pájecí slitiny

Bezolovnaté pájecí slitiny slouží jako náhrada olovnatých pájek. Svými vlastnostmi se liší od olovnatých slitin. Obecně mají vyšší teplotu tavení. Mezi požadavky na bezolovnaté slitiny patří kompatibilita s používanými zařízeními a postupy (trubičkové pájky, pájecí pasty, pájení vlnou) a

stejně, nebo lepší vlastnosti než pájky olovnaté. Slitiny jsou dvou až pětisložkové. Nejpoužívanější typy slitin mají teplotu tavení 215 – 220°C. Následující tabulka obsahuje přehled základních bezolovnatých pájecích slitin. [2, 15]

Tab. 2: Přehled základních bezolovnatých pájecích slitin [15]

Složení	Označení	Obsah složky nebo příměsi [%]						Teplota tavení [°C]
		Sn	Ag	Bi	Cu	Sb	Zn	
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

1.3 Tavidla

Tavidla odstraňují oxidy a nečistoty pájených povrchů před pájením. Ideální tavidlo je při pájení nejaktivnější a za provozních teplot neaktivní. [1]

1.3.1 Dělení tavidel

Nejstarší dělení tavidel je podle americké vojenské normy MIL-F-14256. Tato norma už není platná, ale stále se používá. Podle této normy se tavidla dělí podle úrovně aktivity (R, RMA, RA, RSA).

Podle normy ČSN EN ISO 9454-1 se tavidla značí číselně, kde první číslo označuje typ, druhé číslo základní složku a třetí číslo aktivátor, který při zahřátí vyvolá chemickou reakci.

Podle normy ČSN EN 61190-1-1:2002 se tavidla dělí dle základu tavidla a úrovně aktivace. Tavidla jsou na bázi přírodní pryskyřice, syntetické, organických kyselin nebo anorganických látek. Aktivita tavidla i tavidlových zbytků se v normě značí písmeny L (low – nízká), M (medium – střední) a H (high – vysoká). Aktivace halogenidy (anorganické halidy – halidy jsou chemické sloučeniny obsahující ve své molekule některý z halogenů) je značena číslicí 1. [12]

1.3.2 Dělení podle normy MIL-F-14256

Tab. 3: Klasifikace tavidel pro měkké pájení podle normy MIL-F-1456 [1,11,12]

typ R	Tavidlo s nejnižší aktivitou, složené z čisté bílé pryskyřice (kalafuny) rozpuštěné v lihovém ředidle. Tento typ je vhodný pro vysoce pájitelné povrchy. Zbytky tavidla jsou při pokojové teplotě pasivní, proto není potřeba je čistit. Avšak v případě potřeby mohou být odstraňovány pomocí chlorovaného rozpouštědla trichloreтанolu.
typ RMA	Jemně aktivované kalafunové tavidlo (přidáním vhodných organických směsí do typu R). Toto tavidlo zanechává zbytky, které jsou také považovány za pasivní. Odstranění těchto zbytků není nutné, ale mohou být odstraněny pomocí směsi rozpouštědel (např. alkohol smíšený s trichloreтанem).
typ RA	Silně aktivované tavidlo. Nejsilnější a nejaktivnější z kalafunových tavidel. Zbytky musí být po pájení kompletně odstraněny, aby nedošlo ke korozi a snížení spolehlivosti pájených spojů (např. pomocí směsi rozpouštědel izopropanol a trichloreтанol).
typ RSA	Silně aktivované tavidlo. Stejně jako u typu RA musí být zbytky po pájení kompletně odstraněny, aby nedošlo ke korozi a snížení spolehlivosti pájených spojů. Toto tavidlo není formálně součástí vojenské normy, ale je používanější, než tavidlo typu RA.

1.3.3 Dělení podle normy ČSN EN ISO 9454-1

Tab. 4: Klasifikace tavidel pro měkké pájení podle normy ČSN EN ISO 9454-1 [12, 14]

Typ tavidla	Základní složka	Aktivátor	Forma tavidla
1. Pryskyřicové	1. kalafuna 2. bez kalafuny (syntetická pryskyřice)	1. bez aktivátoru 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	A tekuté B tuhé C pasta
2. Organické	1. rozpustné ve vodě 2. nerozpustné ve vodě	1. bez aktivátoru 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	A tekuté B tuhé C pasta
3. Anorganické	1. soli 2. kyseliny 3. zásady	1. NH ₄ Cl (chlorid amonný) 2. bez NH ₄ Cl 3. kyselina fosforečná 4. jiné kyseliny 5. aminy nebo amoniak	A tekuté B tuhé C pasta

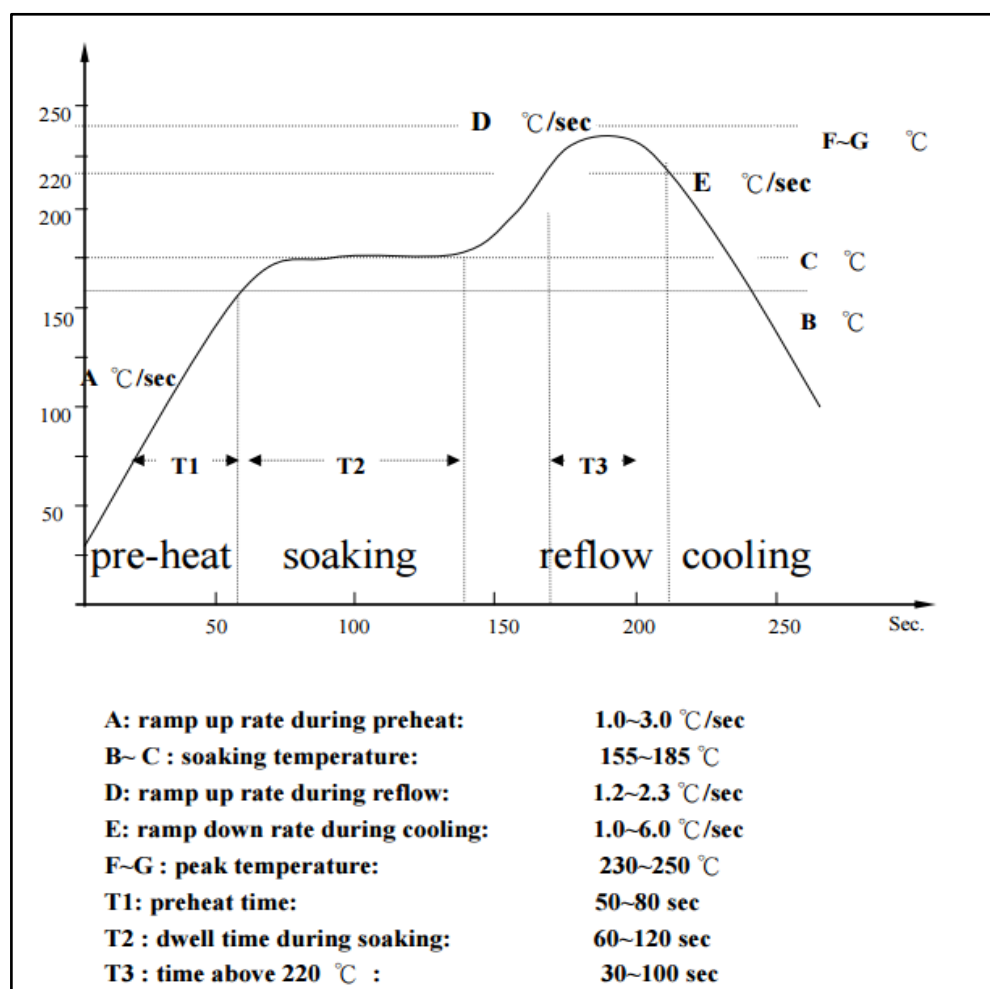
1.3.4 Dělení podle normy ČSN EN 61190-1-1:2002

Tab. 5: Klasifikace tavidel pro měkké pájení podle normy ČSN EN 61190-1-1:2002 [14]

Základ tavidla	Zkratka	Úroveň aktivace					
		L0	L1	M0	M1	H0	H1
		% halidů					
přírodní pryskyřice	RO (rosin)	A	B	C	D	E	F
syntetická pryskyřice	RE (resin)	G	H	I	J	K	L
organické kyseliny	OR (organic)	M	N	P	Q	R	S
anorganické kyseliny	IR (inorganic)	T	U	V	W	X	Y

2. Teplotní profil přetavovací pece

Teplotní profil je teplotní závislost na čase. Je měřen u testovací DPS při průchodu pecí. Bývá předepsán výrobcem pájecí pasty pro její kvalitní přetavení. Na následujícím obrázku si popíšeme jednotlivé oblasti doporučeného teplotního profilu pro pájecí pasty PF606-P a PF606-P30.



Obr. 12: Doporučený teplotní profil pro pájecí pasty PF606-P a PF606-P30 [7]

Tento teplotní profil se dělí na čtyři oblasti:

Oblast přehřevu (pokojová teplota až 155 °C).

Oblast teplotního vyrovnání (155 – 185 °C).

Oblast přetavení (nad 217 °C).

Oblast chlazení (217 °C až pokojová teplota).

2.1 Oblast přehřevu

Při zvyšování teploty dochází k odpařování rozpouštědel v pájecí pastě. Tavidla a tixotropní látky začínají měknout. Je obecně dáno, že bod měknutí pájecí pasty je kolem 100 °C. Nárůst teploty by v tomto případě neměl přesáhnout 3 °C/s. Při příliš velkém nárůstu teploty může dojít ke změknutí tavidla ještě před dostatečným odpařením rozpouštědla, což způsobuje zvodnatění pájecí pasty. Následkem může být tvorba kuliček a můstků. [6, 16]

2.2 Oblast teplotního vyrovnání

V této oblasti dochází k úplnému odpaření rozpouštědel a rovnoměrnému rozložení tepla po celé ploše DPS. Tavidlo přechází do tekutého stavu a rozprostře se přes celou pájenou plochu, čímž ji chrání před další oxidací. Při zvyšování teploty dochází k aktivaci tavidla a následnému odstranění nečistot z pájené plochy DPS. [6, 16]

2.3 Oblast přetavení

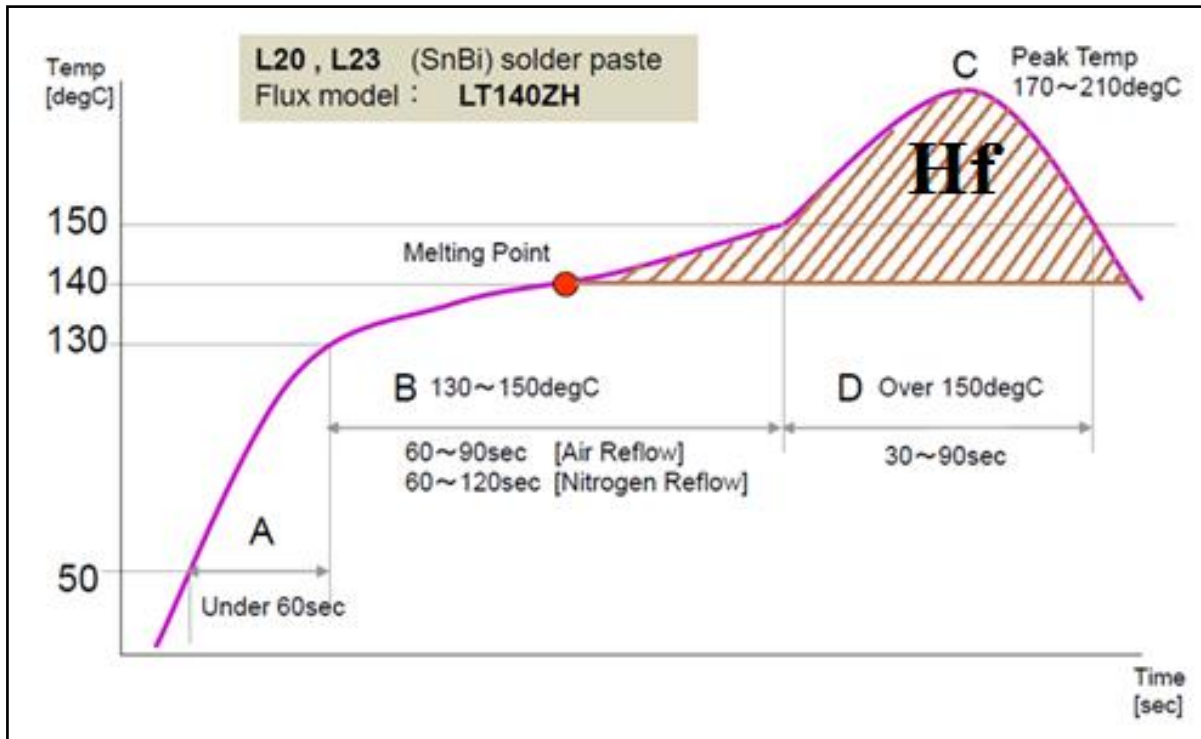
Teplota přesáhne teplotu 217 °C (bod tání pájky). Vznik tekutého pájeného spoje. Je potřeba dostatečně dlouhá doba smáčení, aby se zajistilo kompletní roztavení pájky a aby bylo zajištěno dobré zapájení komponent s vysokou tepelnou kapacitou. Ovšem pokud je doba nad teplotou liquidu příliš dlouhá, dochází ke vzniku křehkých spojů. Pokud bude teplota příliš vysoká, může dojít k poškození součástí na DPS. Naopak při nedostatečném prohřátí DPS dojde k nesprávnému přetavení pájecí pasty. [6, 16]

2.4 Oblast chlazení

V oblasti chlazení dochází k tuhnutí pájky a chladnutí celé DPS. Pokles teploty by měl být co nejrychlejší za účelem kontroly velikosti zrna, ale neměla by přesáhnout 6 °C/s. Při malém poklesu teploty vznikají větší zrna, která snižují kvalitu spoje. [6, 16]

3. Heating factor

Integrál teploty a času pájení, neboli heating factor, je plocha pod křivkou teplotního profilu, omezená teplotou tání pájky (viz Obr. 12). Je to množství tepla, které pájka dostane za bodem tání (nad teplotou liquidu).



Obr. 13: Heating factor u doporučeného teplotního profilu pro bizmutovou pájku (Sn42/Bi58) [10]

Matematicky lze heating factor definovat jako [6]:

$$hf = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_m) dt \quad (3.1)$$

kde	hf [s·K]	heating factor,
	T_m [K]	teplota bodu tání pájecí pasty,
	T [K]	měřená teplota,
	t_1 [s]	čas, kdy $T \geq T_m$,
	t_2 [s]	čas, kdy $T \leq T_m$.

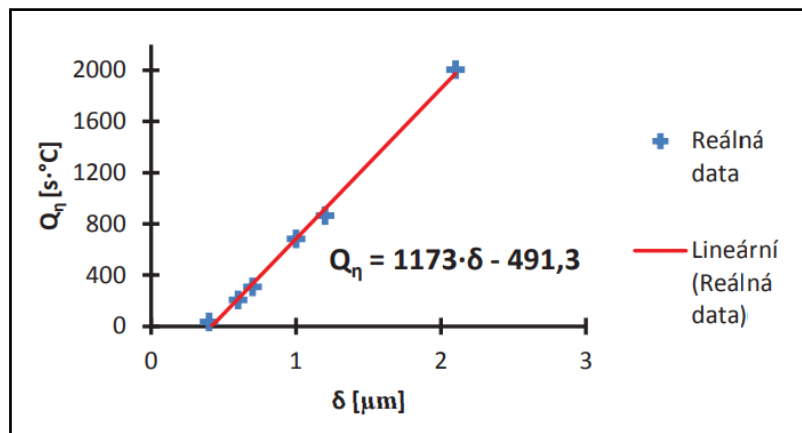
Experimentálně bylo zjištěno, že tloušťka IML se téměř lineárně zvyšuje se zvětšujícím se heating factorem až do dosažení saturační hodnoty. Dále bylo zjištěno, že tato hodnota se při použití

pájky Sn63Pb37 na měděné pájecí plošce pohybuje okolo 3 μm . Na základě experimentu byla stanovena přibližná rovnice závislosti tloušťky IML na heating factoru pro pájku Sn63Pb37 [9]:

$$hf = 1174 \cdot D_0 - 491,3 \quad (3.2)$$

kde hf [s·K] heating factor,
 D_0 [μm] tloušťka IML.

Závislost tloušťky IML na heating factoru je zobrazena na následujícím obrázku.



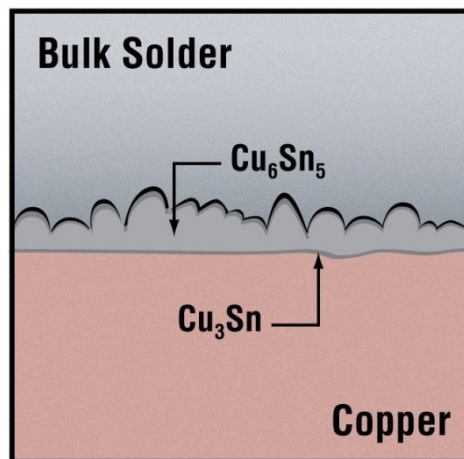
Obr. 14: Závislost tloušťky IML na heating factoru [9]

Lineární růst IML v závislosti na heating factoru naznačuje, že tvorbu IML lze poměrně snadno řídit. Při vhodném zvolení heating factoru lze dosáhnout ideální tloušťky IML. [9]

4. Intermetalické vrstvy (IML – Intermetallic layer)

IML vznikají u difúzních spojů při tuhnutí pájeného spoje. Jsou důležité pro dobré mechanické i elektrické propojení mezi pájkou a substrátem.

Na obr. 13 je příklad IML, která vzniká na rozhraní dříve nepoužívanější eutektické pájky Sn-Pb na měděném substrátu. Po smáčení se zde formuje IML Cu_6Sn_5 o tloušťce několika desetin mikrometru. Při vyšších teplotách zde vzniká další IML Cu_3Sn , která je ale nežádoucí z důvodu snížení smáčivosti.



Obr. 15: Intermetalická vrstva mezi Sn-Pb pájkou a Cu substrátem [5]

4.1 Vlastnosti intermetalických sloučenin

Mezi vlastnosti intermetalických sloučenin patří vysoká teplota tání, křehkost, horší smáčivost a horší tepelná a elektrická vodivost. Vznikají na rozhraní dvou spojovaných materiálů. Některé vlastnosti IMC (Intermetallic compound) v porovnání s mědí jsou v následující tabulce.

Tab. 6: Vlastnosti IMC v porovnání s mědí [21]

Vlastnost	Intermetalická sloučenina			Cu
	Cu_6Sn_5	Cu_3Sn	Ni_3Sn_4	
Tvrdość (Vickers) [$\text{kg}\cdot\text{mm}^2$]	378(± 55)	343(± 47)	365(± 7)	50
Mechanický charakter [-]	Křehká	Křehká	Křehká	Tvárná
Teplotní roztažnosť [$\text{pm}\cdot\text{K}$]	16,3	19,0	13,7	16,0
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$]	34,1	70,4	19,6	385,0
Měrná rezistivita [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]	17,5	8,9	28,5	1,7

Pro přehled intermetalických sloučenin, které mohou vzniknout u bezolovnatých pájecích slitin, slouží následující tabulka.

Tab. 7: Možné intermetalické sloučeniny u bezolovnatých pájecích slitin [22]

Slitina pájky	IMC v pájce	IMC na měděném podkladu
Sn-3,5Ag	Ag ₃ Sn	Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
Sn-3,4Ag-0,8Cu	Ag ₃ Sn, Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn	Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
Sn-3Ag-1Bi-0,5Cu	Ag ₃ Sn, Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn	Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
Sn-3Ag-3Bi	Ag ₃ Sn	Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
Sn-0,7Cu	Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn	Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
Sn-9Zn	-	CuZn, Cu ₅ Zn ₈ , Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
Sn-8Zn-3Bi	-	CuZn, Cu ₅ Zn ₈ , Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
Bi-43Sn	-	Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn, Cu-Sn-Bi
Bi-42Sn-0,5Ag	Ag ₃ Sn	Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn, Cu-Sn-Bi
Sa-5Sb	Sb ₂ Sn ₃	Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn
In-48Sn	-	Cu ₆ Sn ₅ , Cu ₃ Sn, Cu-In-Sn

4.2 Vznik IML

Při pájení je mezi měděným substrátem a pájkou vytvářena IML. Samotná difúzní zóna se začíná utvářet v okamžiku začátku smáčení povrchu měděného substrátu roztavenou pájkou.

Pro tloušťku vytvořené difúzní vrstvy Z_0 po době pájení t platí [6]:

$$Z_0 = \sqrt{D \cdot t} \quad (4.2.1)$$

kde Z_0 tloušťka IML [m],
 D součinitel difúze [m^2s^{-1}],
 t čas (doba pájení) [s].

Arrheiova rovnice pro výpočet součinitele difúze D [6]:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (4.2.2)$$

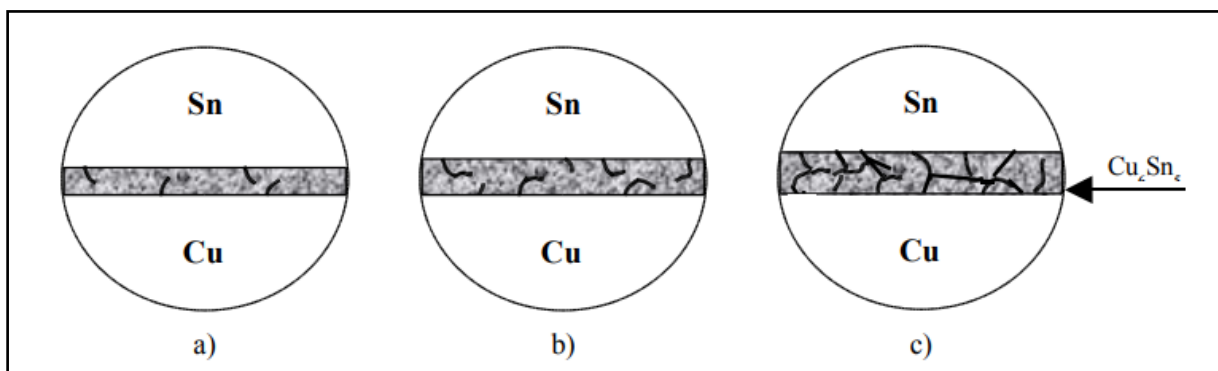
kde D součinitel difúze [m^2s^{-1}],
 D_0 difúzní koeficient [m^2s^{-1}],
 Q aktivační energie růstu IML [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$],
 R plynová konstanta 8,314 [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$],
 T absolutní teplota [K].

Se zvyšující se teplotou se exponenciálně zvyšuje součinitel difúze D . Nadměrný růst IML je během pájení způsoben vyšší teplotou i delší dobou pájení. Uvedené rovnice platí pro difúzi v čistých kovech. Pro vícesložkové pájky (jednotlivé prvky mohou vytvářet tuhé roztoky, eutektické směsi a intermetalické sloučeniny), u kterých difúze probíhá v několika fázích, mohou být rovnice modifikovány. [6]

4.3 Stárnutí IML

Tloušťky IML ihned po pájení bývají v řádech mikrometrů, ale mohou narůst až do desítek mikrometrů. Příliš velká tloušťka IML má pak za následek zvýšení elektrického odporu nebo mechanické poškození spoje. Rychlost růstu IML je ovlivněna zejména teplotou, vlastnostmi pájecí slitiny, objemem pájky a tvarem povrchu.

Tloušťka IML se zvětšuje při pokojové teplotě, nebo ohřevem spoje v průběhu provozu. Stárnutí a namáhání IML se projevuje vznikem trhlin, které snižují životnost spoje. Se zvětšujícím se počtem trhlin, se zvyšuje přechodový odpor spoje, který má za následek vyšší tepelné namáhání spoje. Z tohoto důvodu se tloušťka IML a trhliny neustále zvětšují. [20]



Obr. 16: Znázornění vlivu stárnutí a namáhání v IML Cu_6Sn_5 [26]

- Ve vrstvě se objevují trhliny.
- Vrstva roste a trhlín přibývá a zvětšují se.
- Vrstva a trhliny jsou natolik velké, že může dojít až k nefunkčnosti spoje. [26]

4.4 Porovnání IML bezolvnaté pájky vůči olovnaté

U pájení pájkou SAC (bezolvnatá pájka Sn-Ag-Cu) dochází oproti pájení olovnatou pájkou Sn63Pb37 k vytvoření silnější IML i k jejímu rychlejšímu růstu. Je to způsobeno vyšším obsahem cínu ve slitině SAC, vyšší teplotou pájení i případnou delší dobou pájení.

Tloušťka IML u SnPb pájky je okolo $1,4 \mu\text{m}$ a u SAC slitiny se pohybuje mezi $1,7 - 2,9 \mu\text{m}$. To znamená, že u SAC slitiny jsou tloušťky IML o 21 – 107 % větší. [6]

5. Experimentální část

Cílem tohoto experimentu je pozorování růstu intermetalických vrstev u pájení přetavením. Velikost těchto vrstev lze ovlivnit zvoleným pájecím profilem.

5.1 Použité materiály a přístroje

bezolovnatá pájecí pasta PF606-P30 a PF606-P

vzorky DPS (měděné pájecí plošky, povrchová úprava pájecích plošek: OSP)

aparatura pro šablonový tisk

přetavovací tunelová pec Mistral 260

profilometr KIC Explorer

binokulární lupa Vision HAWK DUO QC-5000

stolní počítač

pájecí sestava JBC DD 2A

5.1.1 Pájecí pasty

Parametry pájecích past jsou uvedené v následující tabulce.

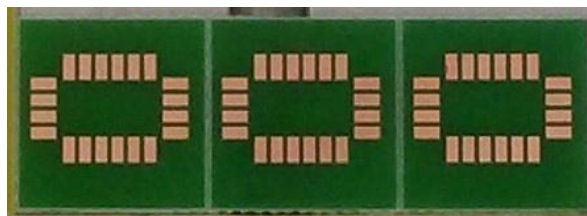
Tab. 8: Parametry pájecích past použitých pro experimentální část práce [7] [8]

pasta	PF606-P30	PF606-P
složení	Sn96,5/Ag3,0/Cu0,5	Sn96,5/Ag3,0/Cu0,5
tavidlo	ROL0	ROL1
velikost kuliček	20-45um	20-45um
teplota tání	217-219°C	217-219°C
viskozita	200±30 Pa·s	200±30 Pa·s

V tabulce 8 si můžeme všimnout, že se pájecí pasty obsahem liší pouze v tavidle, konkrétně pouze v aktivaci halogenidy. Podle normy ČSN EN 61190-1-1:2002 je tavidlo ROL na bázi přírodní pryskyřice s nízkou aktivitou tavidla i tavidlových zbytků. Tavidlo ROL1 je aktivované halogenidy, tavidlo ROL0 nikoliv.

5.1.2 Testovací vzorky

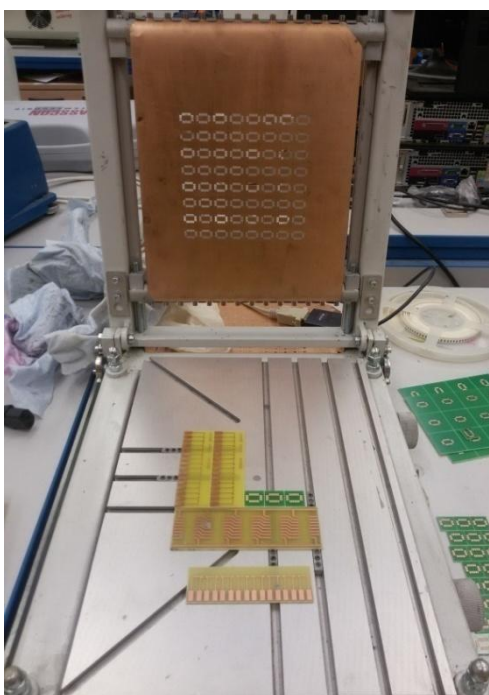
Pro každou pájecí pastu byly použity tři teplotní profily. Pro každý tento profil bylo vytvořeno 18 vzorků. Celkem tedy $2 \times 3 \times 18 = 108$ vzorků. Na obrázku 2.2.1 je DPS, která má sice 60 měděných pájecích plošek, ale pro pozorování intermetalických vrstev jich bude využito pouze 18. Každá deska tedy obsahuje 18 vzorků.



Obr. 17: DPS pro 18 vzorků

5.1.3 Aparatura pro šablonový tisk

Pro nanášení pájecí pasty na vzorky DPS jsem používal aparaturu pro šablonový tisk. Zařízení se skládá z plochého stolu pro jednostranný tisk, šroubovacího napínacího rámu na šablony a šablony samotné. Pájecí pastu jsem roztíral pomocí gumové stěrky.



Obr. 18: Aparatura pro šablonový tisk

5.1.4 Přetavovací tunelová pec Mistral 260

Pro přetavení pájecí pasty na vzorcích DPS jsem použil přetavovací tunelovou pec Mistral 260. Pec obsahuje tři tepelné zóny, kde se dá u každé nastavit jiná teplota. Jednotlivé teploty a rychlost dopravníku se nastavují pomocí dotykového displeje. Na horní straně pece je dvojitě, tepelně izolující sklo pro sledování průběhu přetavení.



Obr. 19: Přetavovací tunelová pec Mistral 260 [17]

5.1.5 Profilometr KIC Explorer

Pro měření a nastavování teplotních profilů jsem používal profilometr KIC Explorer. Na tento profilometr je možné připojit až sedm termočláneků, pro měření jsem ale používal pouze dva. Zařízení měří v rozsahu $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 20: Profilometr KIC Explorer

5.1.6 Binokulární lupa Vision HAWK DUO QC-5000

Binokulární lupa je od firmy Vision Engineering dodávána společně se softwarem, který umožňuje propojení lupy s počítačem a zvětšený obraz tak můžeme pozorovat a dokumentovat pomocí počítače. Na lupě lze díky vyměnitelným čočkám dosáhnout od desetinásobného až po tisícínásobné zvětšení. [18]



Obr. 21: Binokulární lupa Vision HAWK DUO QC-5000 [18]

5.1.7 Pájecí sestava JBC DD 2A

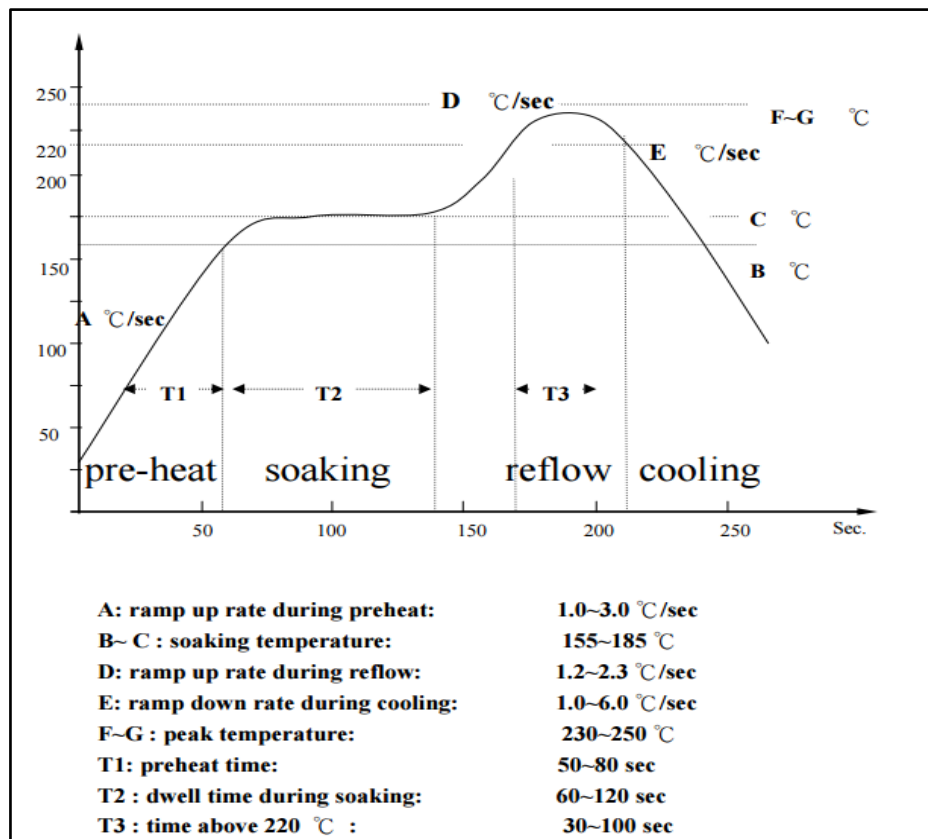
Pájecí sestavu jsem používal k připájení termočlánku na vzorek DPS pro měření teplotních profilů. Skládá se z pájecí stanice a pájecího pera, na kterém je připevněn pájecí hrot. Teplotu na pájecím hrotu můžeme u této pájecí stanice nastavit od 90 °C do 450 °C.



Obr. 22: Pájecí stanice JBC DD 2A [19]

5.2 Teplotní profil

Doporučený teplotní profil od výrobce pro pájecí pasty PF606-P a PF606-P30:

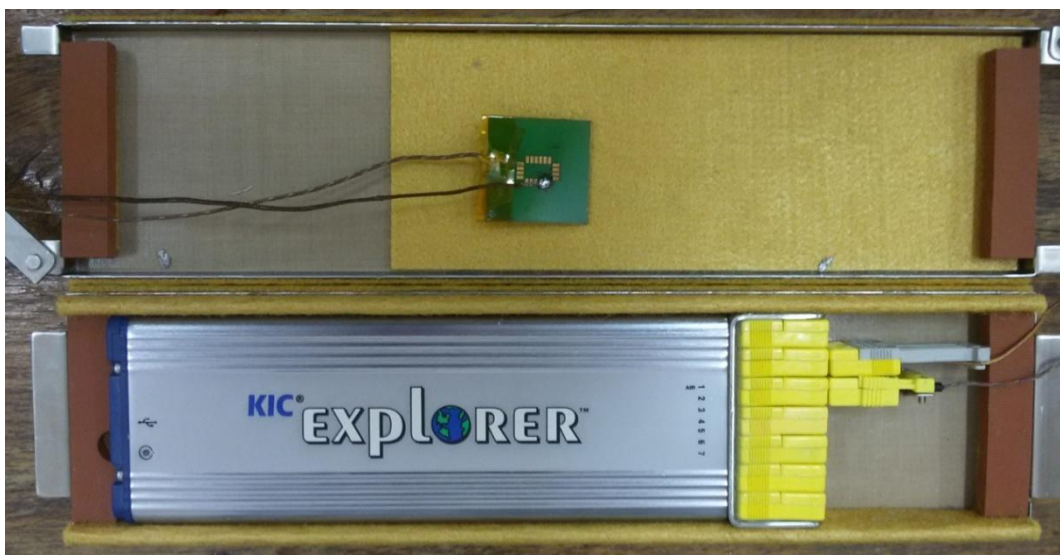


Obr. 23: Teplotní profil pro pájecí pasty PF606-P a PF606-P30 [7]

5.3 Postup experimentu

5.3.1 Přípravek pro měření teplotních profilů

Pro správné měření teplotních profilů jsem musel důkladně připevnit termočlánky k měřenému vzorku. Rozhodl jsem se pro aplikaci dvou termočlánků. Jeden připevněný pomocí pájky s vysokou teplotou tání (pomalejší reakce na změnu teploty) a druhý přichycený k povrchu měděné plošky pomocí kaptonové pásky (rychlejší reakce na změnu teploty).



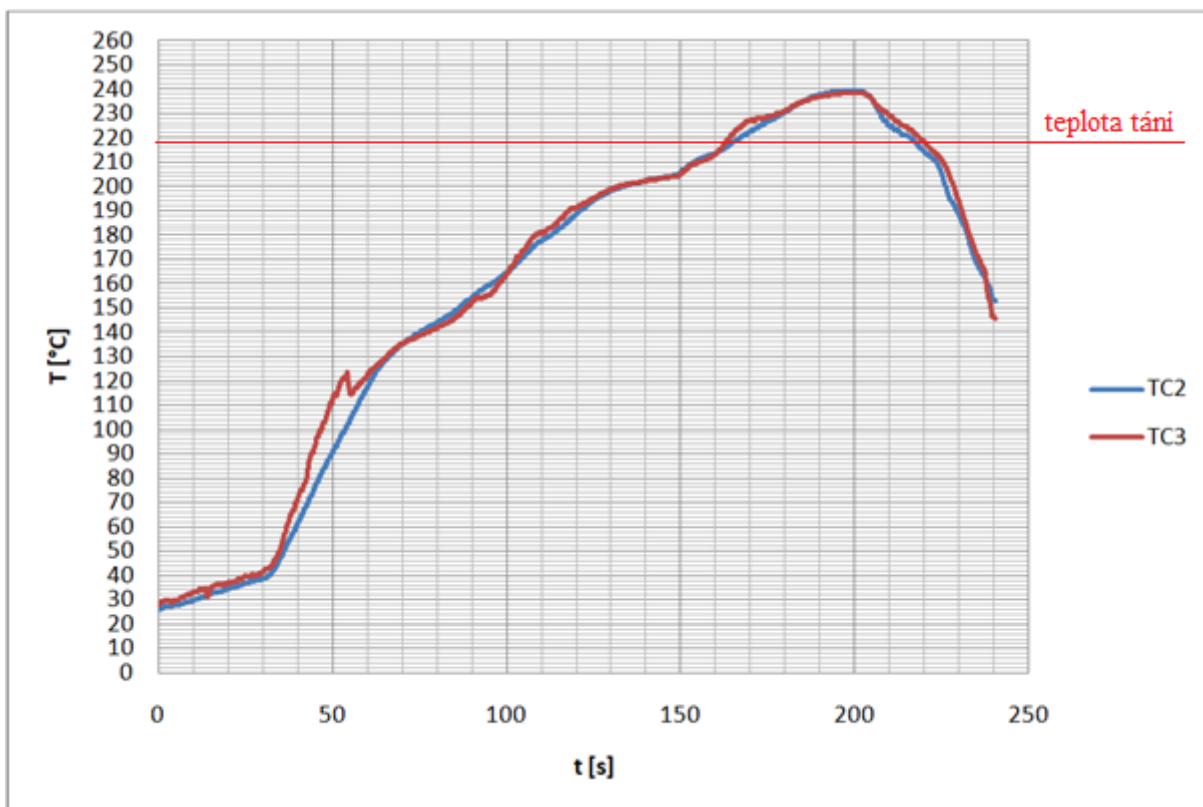
Obr. 24: Profilometr KIC Explorer s vzorkem pro měření teplotních profilů

5.3.2 Nastavování teplotních profilů

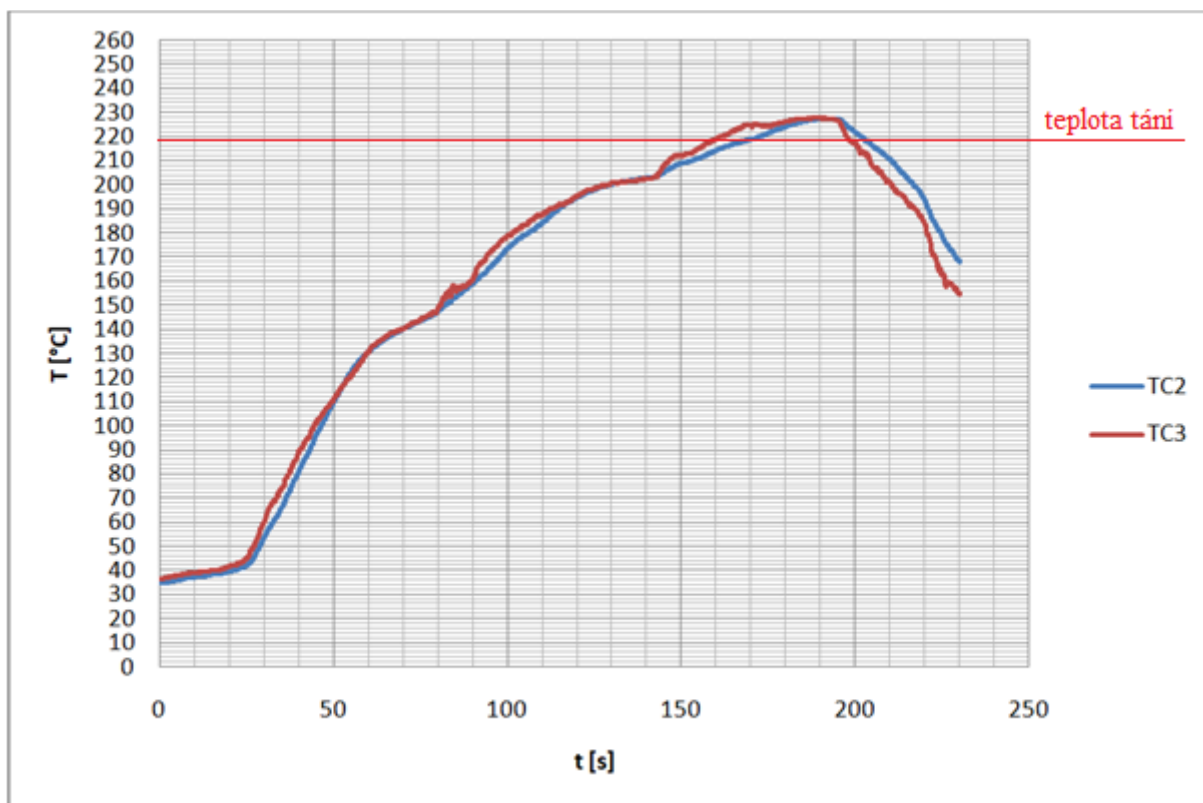
Z doporučeného teplotního profilu pro pájecí pasty PF606-P a PF606-P30 jsem pomocí volně dostupného grafického editoru GIMP určil heating factor, který jsem se následně snažil nastavit v laboratorní peci. Po úspěšném nastavení doporučeného heating factoru jsem se snažil nastavit další teplotní profily tak, aby byl heating factor přibližně třetinový a dvojnásobný. Výsledné heating factory jsem zpracoval do tabulky 9. Rychlost dopravníku u laboratorní pece byla nastavena na 22 cm/min. Čas průchodu každou tepelnou zónou byl tedy 60 s.

Tab. 9: Použité heating factory

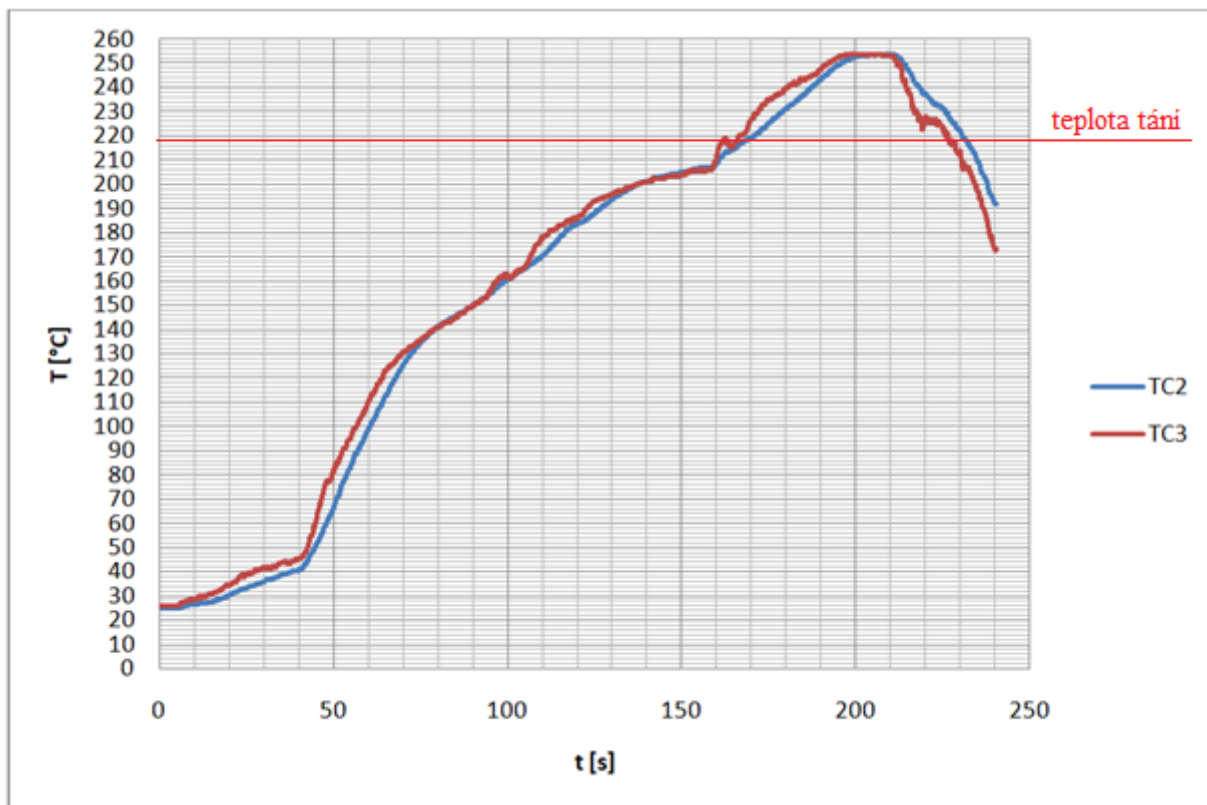
heating factor	[sK]	teploty v peci [°C]
hf0 doporučený	708,1	-
hf1	231	180-220-230
hf2	707	180-220-245
hf3	1355	180-220-265



Obr. 25: Naměřený doporučený teplotní profil ($hf_2 = 707$ sK)



Obr. 26: Teplotní profil pro třetinový heating factor ($hf_1 = 231$ sK)



Obr. 27: Teplotní profil pro dvojnásobný heating factor ($hf3 = 1355$ sK)

Termočlánky:

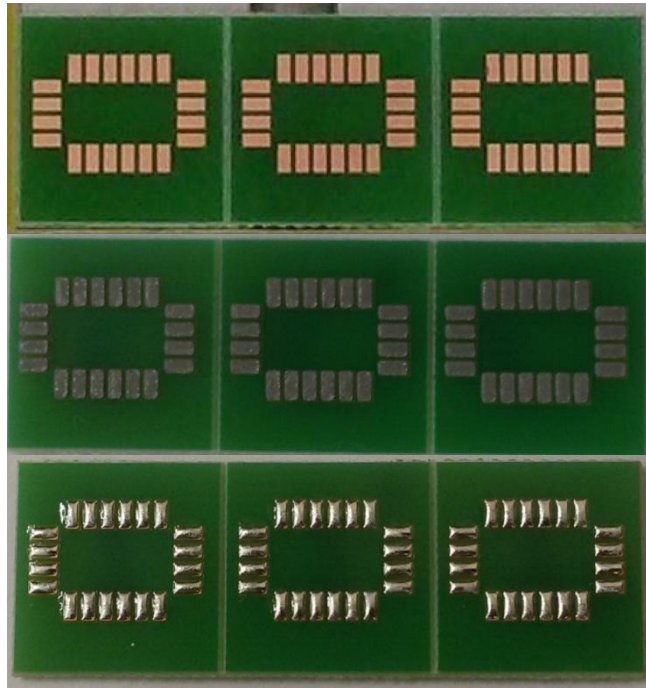
- TC2 - pomalejší reakce na změnu teploty
- TC3 - rychlejší reakce na změnu teploty

5.3.3 Tisk DPS

Pomocí šablony pro tisk DPS jsem na vzorky nanesl jednotlivé pasty. Tyto natisknuté vzorky jsem nechal přetavit v laboratorní peci s nastavenými příslušnými profily (viz. tab. 10).

Tab. 10: Seznam vzorků

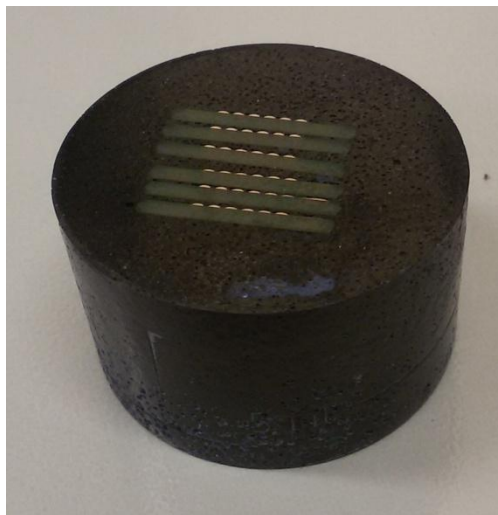
číslo vzorku	typ použité pasty	heating factor [sK]
1	PF606-P30	231
2	PF606-P	231
3	PF606-P30	707
4	PF606-P	707
5	PF606-P30	1355
6	PF606-P	1355



Obr. 28: Vzorek bez pasty, s pastou a po přetavení

5.3.4 Tvorba vzorků pro pozorování IML

Poslední fází při výrobě vzorků bylo jejich zalití do elektricky vodivé pryskyřice a následné vybroušení a vyleštění.



Obr. 29: Výsledné vzorky zalité v elektricky vodivé pryskyřici

5.3.5 Mikroskopie

Vyhotovené vzorky jsem pozoroval pomocí laboratorního mikroskopu, propojeného s počítačem, pomocí kterého jsem mohl dokumentovat výsledné intermetalické vrstvy. Pro pozorování jsem používal objektivy se zvětšením 10x a 100x.

Na následujících obrázcích jsou fotografie vzorků s různými použitými teplotními profily při zvětšení 100x, na kterých je vidět odlišnost tloušťky intermetalických vrstev.



Obr. 30: Intermetalická vrstva při $hf_1 = 231$ sK (doporučený $hf = 708,1$ sK)



Obr. 31: Intermetalická vrstva při $hf_2 = 707$ sK (doporučený $hf = 708,1$ sK)



Obr. 32: Intermetalická vrstva při $hf_3 = 1355$ sK (doporučený $hf = 708,1$ sK)

5.4 Měření tloušťek IML pomocí programu GIMP

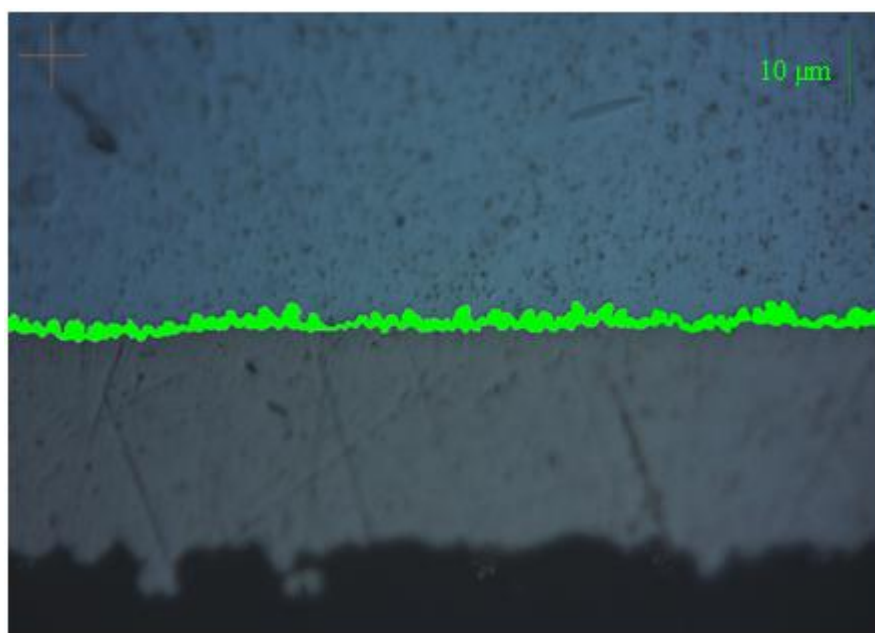
Pro samotné měření tloušťky jednotlivých IML jsem se rozhodl použít volně šiřitelný grafický editor GIMP, který jsem použil i k určení heating factoru u doporučeného teplotního profilu od výrobce.

5.4.1 Vyznačení oblasti IML

Program sice podporuje funkci automatického výběru, ale v tomto případě byla tato funkce velice nepřesná. Z tohoto důvodu jsem u vzorků vyznačil oblast IML ručně. Vyznačenou oblast již funkce automatického výběru vybere správně.



Obr. 33: Fotografie vzorku před vyznačením IML



Obr. 34: Fotografie vzorku s ručně vyznačenou IML

5.4.2 Přepočet z pixelů na jednotku délky

Pro přepočet z pixelů na jednotku délky jsem použil měřítko, které je vyznačeno u každého vzorku zelenou čarou v pravé horní části obrázku. Měřítka představuje délku 10 μm .

Platí tedy, že 10 μm = 110 pixelů.

5.4.3 Určení tloušťky IML

Pro výpočet tloušťky IML jsem použil následující vzorec:

$$D_0 = k \cdot \frac{A_i}{l_i} \quad (5.4.3)$$

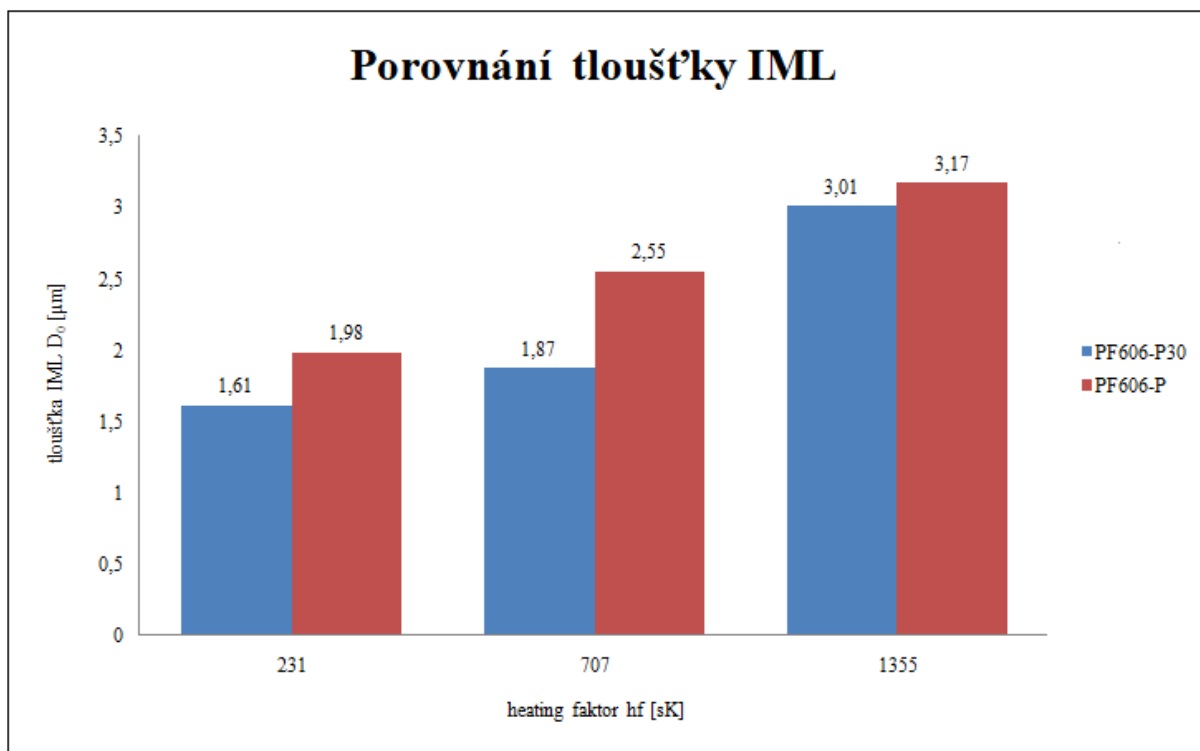
kde D_0 [μm] tloušťka IML,
 k [$\mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1}$] měřítko, $k = \frac{10}{110} \mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1}$,
 A_i [pixel^2] plocha vyznačené IML,
 l_i [pixel] délka vyznačené oblasti.

5.5 Naměřené údaje

Pro měření bylo použito dvou pájecích past. Pro každou pájecí pastu byly použity tři teplotní profily. Pro každou pájecí pastu a teplotní profil jsem naměřil údaje ze třech vzorků. Celkem je tedy naměřeno 27 údajů. Následující tabulka obsahuje naměřené hodnoty jednotlivých vzorků.

Tab. 11: Naměřené údaje

vzorek			plocha vyznačené IML	délka vyznačené oblasti	tloušťka IML	průměrná tloušťka IML pro jednotlivé hf	
pájecí pasta	heating factor hf [sK]		číslo vzorku	A_i [pixel ²]	l_i [pixel]	D_0 [μm]	D_{hf} [μm]
	doporučený	použitý					
PF606- P30	708,1	231	1	24182	1280	1,72	1,61
			2	23974		1,70	
			3	19995		1,42	
		707	4	28261		2,01	1,87
			5	24869		1,77	
			6	25575		1,82	
		1355	7	41578		2,95	3,01
			8	41414		2,94	
			9	44009		3,13	
PF606- P	708,1	231	10	26241	1280	1,86	1,98
			11	26850		1,91	
			12	30591		2,17	
		707	13	37071		2,63	2,55
			14	34344		2,44	
			15	36260		2,58	
		1355	16	47435		3,37	3,17
			17	41871		2,97	
			18	44799		3,18	



Obr. 35: Porovnání tloušťky IML u jednotlivých pájecích past

6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s technologií pájení přetavením, intermetalickými sloučeninami a teplotním profilem. Práce se zvláště zaměřuje na vliv teplotního profilu, respektive heating factoru, na růst IML.

V teoretické části jsem nejprve zpracoval oblast pájení, která úzce souvisí se samotnou tvorbou IML. Jsou zde popsány jednotlivé technologie pájení, přehled pájecích slitin a tavidel. Dále jsem zpracoval teplotní profil přetavovací pece, kde jsem popsal jeho jednotlivé oblasti. Třetí kapitola se zabývá heating factorem a poslední kapitola teoretické části se zabývá vlastnostmi a vznikem intermetalických sloučenin.

Praktická část obsahuje popis experimentu pro tvorbu vzorků pro pozorování růstu IML v závislosti na heating factoru. Pro experiment bylo použito dvou pájecích past se složením slitiny Sn96,5/Ag3,0/Cu0,5, měděných pájecích plošek s povrchovou úpravou OSP a třech teplotních profilů. Pájecí pasty PF606-P30 a PF606-P se svým složením liší pouze v tavidle, a proto byly ideální také k pozorování vlivu tavidla na růst IML. Vyhotovené vzorky IML byly pomocí binokulární lupy zdokumentovány. Následně byly pomocí volně šiřitelného grafického editoru GIMP u vzorků změřeny tloušťky IML.

Tloušťka vrstev se s rostoucím heating factorem zvětšovala. Nejtenčí IML (1,61 μm) se zformovala u pájecí pasty PF606-P30 pro třetinový heating factor oproti doporučenému. Nejsilnější IML (3,17 μm) pak u pájecí pasty PF606-P pro dvojnásobný heating factor oproti doporučenému. Určit, jaký teplotní profil, respektive heating factor, je z hlediska kvality spoje nejlepší, není z hlediska naměřených tlouštěk IML možné. Vzorky by museli být podrobeny dalším testům.

Při porovnání tlouštěk IML u jednotlivých pájecích past jsem zjistil, že se značně liší. U teplotního profilu s heating factorem $hf = 231 \text{ sK}$ je tloušťka IML u pájecí pasty, která obsahuje tavidlo aktivované halogenidy, větší o 23 %, než u pájecí pasty, která obsahuje tavidlo bez aktivace halogenidy. U teplotního profilu s $hf = 707 \text{ sK}$ o 36 % a u teplotního profilu s $hf = 1355 \text{ sK}$ o 5 %. To znamená, že druh použitého tavidla v pájecí pastě má velký vliv na tvorbu IML.

Výsledkem experimentu je tedy potvrzení teoretického předpokladu, že tloušťka IML s rostoucím heating factorem roste. Dále byla zjištěna skutečnost, že významným faktorem, ovlivňujícím tloušťku IML, je druh použitého tavidla v pájecí pastě.

Vznik IML je nezbytný pro dobré mechanické i elektrické spojení pájených materiálů. Ideální tloušťky IML pro vytvoření mechanicky pevného a zároveň spolehlivého spoje u jednotlivých pájecích past a substrátů není zcela známa. Je proto důležité nové pájecí pasty před použitím ve výrobě důkladně otestovat.

7. Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice 2005, ISBN 80-903597-0-1.
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001.
- [3] URBÁNEK J., KLABAČKA E.: Technologie elektronických zařízení, ČVUT Praha, 1997.
- [4] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2.
- [5] Materials Matters: Solder Joint Reliability [online]. [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: <http://flex.iconnect007.media/index.php/article/19094/materials-matters-solder-joint-reliability/19097/?skin=flex>
- [6] DOSEDLA, Milan. Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu spoje. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [7] Datasheet pájecí pasty PF606-P [online]. [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: [http://avipre.com/products/printers/Shenmao%20Solder,%20Solder%20Paste,%20Solder%20Sphere,%20Solder%20Wire%20and%20Bar/Product%20Data%20Sheets/Lead-Free%20Solder%20Paste%20P%20Series/PF606-P\(TDS\).pdf](http://avipre.com/products/printers/Shenmao%20Solder,%20Solder%20Paste,%20Solder%20Sphere,%20Solder%20Wire%20and%20Bar/Product%20Data%20Sheets/Lead-Free%20Solder%20Paste%20P%20Series/PF606-P(TDS).pdf)
- [8] Datasheet pájecí pasty PF606-P30 [online]. [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: <http://www.ben-technologies.com/support/wp-content/uploads/2016/02/PF606-P30TDS-E03-00.pdf>
- [9] JEŽEK, Vladimír. Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [10] Teplotní profil pro bizmutovou pájku, získaný přímo od výrobce.
- [11] Tavidla [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <http://www.erescom.cz/index4.html>
- [12] JURČÍČEK, Petr. Pájecí stanice pro SMD součástky. Zlín, 2007. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
- [13] KOBLÍŽEK, Vilém. Měkké pájení v elektronice [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13TEP_soubory/uloha_2.pdf

- [14] KOUŘIL, Michal. Technologické aspekty bezolovnatého pájení v mikroelektronice. Zlín, 2007. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. Petr Neumann, Ph.D.
- [15] ZAHRADNÍK, Vít. Sledování chování pájecích slitin prostřednictvím sledování latentního tepla. Praha, 2017. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.
- [16] FILÁKOVÁ, Denisa. Technologie pájení přetavením. Zlín, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. Petr Neumann, Ph.D.
- [17] Přetavovací pec Mistral 260 [online]. [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: <http://www.abetec.cz/eshop/product/prubezna-pretavovaci-pec-sha-one/>
- [18] Datasheet binokulární lupy AWK DUO QC-5000 [online]. [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: <http://www.optimaxonline.com/pdf/Optimax%20Hawk%20Family%20Brochure.pdf>
- [19] Pájecí stanice JBC-DD-2A [online]. [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/pages/Product_of_the_week:cislicova-pajeci-odpajeci-stance-jbc-dd-2a.html
- [20] HRABÁK, Petr. Vznik a růst intermetalických sloučenin u bezolovnatých pájených spojů. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Václav Wirth.
- [21] MACH, Ladislav. Vliv množství pájky a izotermálního stárnutí na vodivost pájeného spoje. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [22] LAČNÝ, Radek. Elektrická vodivost pájeného spoje a vliv na spolehlivost. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [23] MACH, Pavel. Pájení [online]. [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/44479/mod_resource/content/1/Pajeni.pdf
- [24] Pájení [online]. [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-laserem/pajeni-laserem/>
- [25] Horkovzdušná stanice JBC JT-2D [online]. [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: <https://www.pajeci-technika.cz/www-pajeci-technika-cz/eshop/40-1-Pajeci-technika-JBC/0/5/1538-Horkovzduzna-stance-JBC-JT-2D>
- [26] Szendiuch, Ivan. Pájení a bezolovnaté pájky [online]. [cit. 2017-12-27]. Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>

[27] Pájení přetavením v SMT výrobě – moderní požadavky [online]. [cit. 2017-12-29].
Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:29239>

8. Seznam obrázků

Obr. 1: Metody pájení [1].....	10
Obr. 2: Tvorba ručně pájeného spoje [13]	11
Obr. 3: Dusíková přetavovací pec [27].....	12
Obr. 4: Pájení ohřevem IR zářiči [23]	13
Obr. 5: Pájení laserem [24].....	14
Obr. 6: Jednouúčelové pájecí zařízení pro montáž integrovaných obvodů [23]	14
Obr. 7: Horkovzdušná stanice JBC JT-2D [25].....	15
Obr. 8: Zařízení pro pájení v parách (v dávkách) [23].....	15
Obr. 9: Zařízení pro pájení v parách (kontinuální) [23].....	16
Obr. 10: Pájení vlnou [23].....	18
Obr. 11: Pájení Omega vlnou [23].....	18
Obr. 12: Doporučený teplotní profil pro pájecí pasty PF606-P a PF606-P30 [7]	22
Obr. 13: Heating factor u doporučeného teplotního profilu pro bizmutovou pájku (Sn42/Bi58) [10] ..	24
Obr. 14: Závislost tloušťky IML na heating factoru [9]	25
Obr. 15: Intermetalická vrstva mezi Sn-Pb pájkou a Cu substrátem [5]	26
Obr. 16: Znázornění vlivu stárnutí a namáhání v IML Cu ₆ Sn ₅ [26].....	28
Obr. 17: DPS pro 18 vzorků.....	30
Obr. 18: Aparatura pro šablonový tisk	30
Obr. 19: Přetavovací tunelová pec Mistral 260 [17].....	31
Obr. 20: Profilometr KIC Explorer.....	31
Obr. 21: Binokulární lupa Vision HAWK DUO QC-5000 [18]	32
Obr. 22: Pájecí stanice JBC DD 2A [19].....	32
Obr. 23: Teplotní profil pro pájecí pasty PF606-P a PF606-P30 [7].....	33
Obr. 24: Profilometr KIC Explorer s vzorkem pro měření teplotních profilů.....	34
Obr. 25: Naměřený doporučený teplotní profil (hf2 = 707 sK)	35
Obr. 26: Teplotní profil pro třetinový heating factor (hf1 = 231 sK).....	35
Obr. 27: Teplotní profil pro dvojnásobný heating factor (hf3 = 1355 sK).....	36
Obr. 28: Vzorek bez pasty, s pastou a po přetavení.....	37
Obr. 29: Výsledné vzorky zalité v elektricky vodivé pryskyřici.....	37
Obr. 30: Intermetalická vrstva při hf1 = 231 sK (doporučený hf = 708,1 sK)	38
Obr. 31: Intermetalická vrstva při hf2 = 707 sK (doporučený hf = 708,1 sK)	38
Obr. 32: Intermetalická vrstva při hf3 = 1355 sK (doporučený hf = 708,1 sK)	39
Obr. 33: Fotografie vzorku před vyznačením IML.....	40
Obr. 34: Fotografie vzorku s ručně vyznačenou IML.....	40
Obr. 35: Porovnání tloušťky IML u jednotlivých pájecích past	43

9. Seznam tabulek

Tab. 1: Vliv příměsí na vlastnosti pájky [15]	19
Tab. 2: Přehled základních bezolovnatých pájecích slitin [15]	20
Tab. 3: Klasifikace tavidel pro měkké pájení podle normy MIL-F-1456 [1,11,12]	21
Tab. 4: Klasifikace tavidel pro měkké pájení podle normy ČSN EN ISO 9454-1 [12, 14]	21
Tab. 5: Klasifikace tavidel pro měkké pájení podle normy ČSN EN 61190-1-1:2002 [14]	22
Tab. 6: Vlastnosti IMC v porovnání s mědí [21]	26
Tab. 7: Možné intermetalické sloučeniny u bezolovnatých pájecích slitin [22]	27
Tab. 8: Parametry pájecích past použitých pro experimentální část práce [7] [8]	29
Tab. 9: Použité heating factory	34
Tab. 10: Seznam vzorků	36
Tab. 11: Naměřené údaje	42