



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

VLIV POVRCHOVÝCH ÚPRAV DPS NA PÁJITELNOST PŘI PÁJENÍ V PARÁCH

INFLUENCE OF PRINTED BOARD SURFACE FINISHING ON SOLDERABILITY WITH VAPOUR SOLDERING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Matras

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**
Ústav mikroelektroniky

Student: Jan Matras

ID: 162173

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Vliv povrchových úprav DPS na pájitelnost při pájení v parách

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zvolte vhodnou metodu pro vyhodnocení pájitelnosti různých povrchových úprav desek plošných spojů při pájení v parách. Realizujte měření a vyhodnoťte pájitelnost pro různý počet pájených cyklů. Měření realizujte pro vybraný typ bezolovnaté pájecí slitiny.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 2.6.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou pájení v parách a smáčením povrchu pájkou při procesu pájení. Podrobněji popisuje výhody a nedostatky jednotlivých povrchových úprav pájecí ploch na DPS. Obecně charakterizuje vlastnosti bezolovnatých pájek a tavidel. Popisuje princip pájení v parách, včetně vlastností samotné kapaliny. Dále se zaměřuje na metodu vyhodnocování smáčivosti pomocí kuličky pájky a její provedení na jednotlivých vzorcích povrchových úprav.

ABSTRACT

Thesis deals with vapor soldering and wetting the surface with solder during the soldering process. It describes in detail the advantages and disadvantages of various surface finishes on the PCB. Generally characterizes the properties of lead-free solders and fluxes. Describes vapor soldering process, including the properties of the liquid itself. It also focuses on a method of evaluating the wettability by using solder balls and its performance on individual samples surface finishes.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Pájení v parách, povrchové úpravy, bezolovnatá pájka, tavidlo, pájitelnost, smáčivost, SSBA

KEYWORDS:

Vapour soldering, surface finishes, lead-free solder, flux, solderability, wettability, SSBA

MATRAS, J. *Vliv povrchových úprav DPS na pájitelnost při pájení v parách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 40s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh zdvojovače napětí jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Josefu Šanderovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení, za poskytování odborných rad, ochotu a vstřícnost. Dále děkuji firmě Pragoboard s.r.o. za zaslání testovacích vzorků.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

ÚVOD	6
1 POVRCHOVÉ ÚPRAVY MĚDI NA DPS	7
1.1 HAL (HOT AIR LEVELING)	8
1.2 ENIG (ELECTROLESS NICKEL IMMERSION GOLD)	9
1.3 IMERZNÍ CÍN	9
1.4 OSP (ORGANIC SOLDER PRESERVATIVES)	10
2 TAVIDLA	11
3 BEZOLOVNATÉ PÁJKY	12
3.1 SAC PÁJKY	12
4 PÁJITELNOST.....	13
4.1 SMÁČIVOST POVRCHU	13
4.2 DRUHY SMÁČENÍ POVRCHU	14
4.3 SMÁČECÍ ÚHEL	14
5 PÁJENÍ V PARÁCH (VAPOUR PHASE SOLDERING).....	16
5.1 TEPLOTA PROCESU	16
5.2 PRINCIP PÁJENÍ V PARÁCH	17
5.3 VYLEPŠENÍ PROCESU PÁJENÍ.....	18
5.4 KAPALINA (MEDIUM)	19
6 METODA MĚŘENÍ SSBA (SESSILE SOLDER BALL ALIGNMENT).....	20
7 PRAKTICKÁ ČÁST	21
7.1 TAVIDLO	21
7.2 PÁJKA A PROCES PŘETAVENÍ	22
8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	25
8.1 HAL.....	25
8.2 OSP.....	27
8.3 IMERZNÍ CÍN	28
8.4 SOLÁRNÍ ČLÁNKY	29
8.5 ENIG	31
8.6 CHYBY MĚŘENÍ	31

ZÁVĚR	32
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	34
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	36
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ.....	37
SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	38

ÚVOD

Pájení v parách se začalo používat v 70. letech minulého století. Jedná se o způsob pájení, kdy horká pára předává své teplo pájce. Pájení v parách patří mezi jednu z nejspolehlivějších pájecích metod. Je to dáno zejména tím, že přenos tepla probíhá konstantně ve všech částech desky. Proto se často pájení v parách používá k zapájení BGA pouzder, kde je při konvekční pájení problém zapájet vnitřní kuličky pouzdra.

Princip tohoto pájení je vcelku jednoduchý. Osazené desky se umístí na vertikální dopravník a ten je snese do páry, kde proběhne proces přetavení.

Důležité je použití správného média pro daný typ pájky, ve kterém jsou osazeny součástky. Médium musí být takového druhu, aby se při určité teplotě začalo vypařovat a vytvářet hustou mlhu, která bude vytlačovat okolní vzduch. Tím vytvoří ochrannou atmosféru, ve které se nemusíme bát oxidace pájeného spoje.

Proces pájení závisí kromě zvoleného způsobu pájení také na použitém materiálu, jako jsou druh pájky, tavidlo a povrchová úprava plošky substrátu.

Tato práce se také zaměřuje na druh vyhodnocování smáčivosti jednotlivých povrchů pomocí metody SSBA.

Praktická část je zaměřena na testování vzorků povrchových úprav HAL, OSP, ENIG, imerzního cínu a povrchové úpravy na solárních člancích pomocí výše zmíněné metody. Pro testování byla vybrána kulička pájky SAC 405.

1 POVRCHOVÉ ÚPRAVY MĚDI NA DPS

Měď, která tvoří spoje a kontakty na DPS je vysoce náchylná na oxidaci. Z velké většiny je chráněna nepájivou maskou, avšak kontakty jsou odhaleny a proto je potřeba chránit je jednou z možných povrchových úprav. Důležité je, aby povrchová úprava zajišťovala dobrou pájitelnost povrchu, dlouhou dobu skladovatelnosti DPS a respektovala požadavky na montáž. Toto je zvláště důležité u desek s prokovenými otvory.

Všeobecné požadavky na povrchové úpravy DPS:

- Materiálová kompatibilita
 - Materiál musí být chemicko/fyzicky kompatibilní s měděným povrchem DPS
 - Kompatibilní s nepájivou maskou desky

- Procesní kompatibilita
 - Rovný povrch
 - Vhodnost pro fine pitch
 - Možnost pro kontaktování
 - Teplotní stres desky pod 65 °C
 - Teplotní odolnost pro několikanásobný teplotní cyklus
 - Dlouhodobá skladovatelnost a spolehlivost

- Environmentální kompatibilita
 - Netoxická povrchová úprava
 - Ekologická výroba
 - Kompatibilita s environmentálními vlivy [1]

1.1 HAL (Hot Air Leveling)

HAL je povrchová úprava, při které se na měděné plošky nanáší vrstva roztavené pájky. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších procesů, ale už je poměrně zastaralý a energeticky náročný.

Prvně se deska musí očistit, aby se odstranily oxidy z povrchu měděných plošek, dále se nanese snímatelná maska a tavidlo, aby se zamezilo vzniku dalších oxidů na mědi a bylo zajištěno správné nanesení pájky. Po předehřevu deska projede lázní roztavené pájky a přebytečná pájka je odfouknuta horkým vzduchem za pomoci vzduchových nožů.

Výhody HALu:

- Dobrá pájitelnost povrchu
- Levný materiál (pájka)
- Výborná skladovatelnost – 12 měsíců
- Snese několikanásobný teplotní proces

Nevýhody:

- Teplotní šok (při bezolovnatém HALu je mnohem výraznější)
- Nerovnost povrchu pájecích ploch
- Deformace DPS
- Špatná spolehlivost procesu
- Nemožnost kontaktování vodičů
- Nevhodné pro tenké DPS

Pokud povrchová úprava obsahuje olovo u bezolovnatého pájení tak dochází k jevu fillet lifting tzn. zvednutí okraje pájeného spoje. [2]

1.2 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)

Pro provedení povrchové úpravy typu ENIG se nejdříve na měď nanese vrstva chemického niklu o tloušťce 3-6 μm a poté se na nikl nanese tenká vrstva imerzního zlata o tloušťce 0,05-0,1 μm . Hlavní význam zlata v povrchové úpravě je, že funguje jako skvělý krycí materiál proti nečistotám a navíc je zlato velmi odolné proti korozi. Velmi známou vadou, která se vyskytuje u ENIGu je tzv. Black Pad, který vzniká při procesu zlcení, kdy nikl koroduje a při pájení se nanesené zlato odtrhne od niklu a jde vidět pouze zkorodovaný černý nikl.

Výhody:

- Rovinnost povrchu
- Odolnost proti korozi
- Dobrá pájitelnost povrchu
- Výborná skladovatelnost
- Snese několikanásobný teplotní proces
- Možnost kontaktování

Nevýhody:

- Drahá výroba
- Black Pad

1.3 Imerzní cín

Imerzní cín se vytváří selektivní metodou cínování měděných plošek. Prvně se na měď nanáší vrstva organického kovu, tím se vytvoří povrch připravený pro chemické cínování. Tato vrstva má přibližně tloušťku 0,08 μm a zabraňuje mědi difundovat do cínu a udržuje tak pájitelnost cínového povrchu při pájení. Poté se deska vloží do cínovací lázně a nanese se cín o tloušťce 0,8 μm . Výsledkem je matně stříbrný moderní povrch, který odpovídá všem požadavkům na plošné spoje. Na této povrchové úpravě je možné pouze pájet bezolovnatými pájkami. Imerzní cín je velice náchylný na znečištění a třeba dbát na jeho zacházení a skladování. Tudíž desky je potřeba osadit ihned po vyjmutí z obalu. Dalším negativním vlivem na tuto povrchovou úpravu je vznik intermetalických sloučenin Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn mezi vrstvou mědi a cínu. Tyto intermetalické sloučeniny se vyznačují špatnou pájitelností, křehkostí a špatnými tepelnými a elektrickými vlastnostmi. [5]

Výhody [6]:

- Cena
- Nepoužívá se toxické olovo
- Vhodnost pro fine pitch aplikace
- Rovinnost povrchu
- Smáčivost
- Umožňuje cínování i ohebných materiálů
- Úspora energie a nákladů
- Dobrá skladovatelnost

Nevýhody:

- Náchylnost povrchu na nečistoty a poškození

1.4 OSP (Organic Solder Preservatives)

OSP je druh povrchové úpravy, při které se po natisknutí nepájivé masky nanese organické inhibitory oxidace mědi na odhalené měděné plochy. Tato povrchová úprava se nejčastěji používá na jednostranné desky, protože OSP může projít maximálně dvěma procesy pájení. Pro výrobu OSP se nejčastěji používají látky na bázi benzoimidazolů, které jsou po nanesení na povrch mědi vázány slabými Van der Waalsovými silami.

Výhody:

- Rovinnost povrchu
- Bezolovnaté pájení
- Cena
- Nevyskytuje se intermetalická vrstva
- Při pájení se dají použít běžná tavidla

Nevýhody:

- Krátká doba skladovatelnosti (6 měsíců)
- Jelikož je OSP tenká průsvitná vrstva tak je těžké ověřit, zda byl povrch ošetřen
- Maximálně dvojnásobný teplotní cyklus [7] [8]

2 TAVIDLA

Pro zajištění pájitelnosti, spolehlivosti a kvality spoje se používají různé druhy tavidel. Tyto látky se začaly v průmyslu používat, protože znatelně zlepšují smáčivost pájeného spoje a to proto, že očišťují povrch pájecí plošky od nečistot, jako jsou oxidy, mastnota a další nečistoty, které by měly vliv na nedokonalé roztečení roztavené pájky. Tavidlo při zahřátí zvyšuje povrchové napětí pájeného povrchu a tím zvyšuje smáčivost povrchu. Tavidla se vyrábí jak v tuhém a kapalném skupenství, tak i v plynném.

Funkce tavidla:

- Fyzikální: Zlepšuje přenos tepla a odstraňuje nečistoty a reakční produkty z povrchu pájených ploch a zlepšuje roztékavost pájky
- Chemická: Odstraňuje oxidy a mastnotu a brání reoxidaci povrchu pájené plochy.

Tavidlo se skládá ze čtyř hlavních komponent: nosiče, rozpouštědla, aditiva a aktivátoru. Tavidlový nosič se dělí na tři druhy podle složení a to na přírodní pryskyřici, syntetickou pryskyřici a organickou kyselinu. Rozpouštědla v tavidle mohou být založena na organické bázi s obsahem alkoholu, tím pádem se tavidlo označuje VOC (Volatile Organic Compounds) nebo na anorganické bázi bez alkoholu s označením VOC FREE. V tavidlech se používají různé druhy aditiv pro specifické operace, například pro pájení vlnou se používají stabilizátory pěny a antishlukovací činidla. Pomocí aktivátorů, které se skládají z různých druhů kyselin, dosahujeme dobrých pájecích výsledků. [9] [10]

TYP TAVIDLA	ZÁKL. SLOŽKA	AKTIVÁTOR	FORMA TAVIDLA
1. pryskyřicové	1. kalafuna (přir. pryskyřice) 2. bez kalafuny syntetická	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. zysady	1. NH ₄ Cl 2. bez NH ₄ Cl 1. kys. fosforečná 2. jiné kyseliny 1. aminy nebo amoniak	A tekuté B tuhé C pasta

Obr. 2.1 Klasifikace tavidel pro měkké pájení dle ČSN EN ISO 29454-1, původ z [10]

3 BEZOLOVNATÉ PÁJKY

Kvůli toxicitě olova v pájkách se postupně začalo od olovnatých pájek upouštět a bylo zapotřebí vyvinout takové pájky, které by měly nejlépe stejné nebo podobné vlastnosti jako pájky olovnaté. Bezolovnaté pájky se většinou skládají ze dvou až čtyř slitin prvků, které ovlivňují jednotlivé vlastnosti pájky. Každý prvek má své výhody a nevýhody např. stříbro, které kladně ovlivňuje smáčivost, ale na druhou stranu způsobuje zrnitost a důlky na povrchu spoje. Nejčastěji se v bezolovnatých pájkách vyskytuje cín, který je ve slitině přítomen více jak 70%, dále se používá stříbro, měď, nikl a další vzácné kovy. Velikou nevýhodou bezolovnatých pájek oproti pájkám obsahujících olovo je teplota tavení. Nárůst teploty tavení je tak razantní, že při procesu pájení dochází k deformaci desky a k poškození součástek. Proto se musel upravit pájecí proces o další krok předehřevu, aby nedocházelo k teplotnímu šoku. [11]

3.1 SAC pájky

Jedním z hlavních reprezentantů bezolovnatých pájek je SAC pájka, která se skládá z cínu, stříbra a mědi. Tyto tři prvky se kombinují v různých poměrech, avšak nejčastějším je pájka s označením SAC 305, která obsahuje 96,5% Sn, 3% Ag a 0,5% Cu nebo také SAC 405 s 95,5% Sn, 4% Ag a 0,5% Cu. Je to pájka eutektická, to znamená, že má pevný bod přechodu z pevného skupenství do kapalného. Její teplota tavení je 217 °C a je spíše vhodná pro pájení přetavení. SAC pájka se svými vlastnostmi nejvíce blíží pájce olovnaté. Výhoda této pájky je, že má nižší teplotu tavení než pájka Sn100C a to hlavně díky stříbru. Dále se dá pájet i bez ochranné atmosféry a méně kontaminuje pájecí pece. [12]

4 PÁJITELNOST

Je to souhrn vlastností, které udávají, jak je materiál vhodný pro průmyslové pájení. Tyto vlastnosti nejsou stálé, neustále se mění v závislosti na typu skladování, stáří materiálu nebo v důsledek korozních změn povrchu materiálu. Pájitelnost můžeme definovat jako schopnost povrchu být smáčen roztavenou pájkou a obsahuje 3 hlediska:

- Smáčivost: povrch materiálu musí umožnit smáčení po dobu pájení a nesmí být odsmáčen
- Teplotní požadavek: plošky součástek musí být dostatečně prohřáty na požadovanou teplotu během požadované doby
- Odolnost vůči teplu při pájení: je důležité, aby teplotní namáhání pájených dílů neovlivnilo vlastnosti součástek před jejich definovaným teplotním limitem. [13]

4.1 Smáčivost povrchu

Pro vytvoření kvalitního pájeného spoje je nejdůležitější vlastností povrchu smáčivost. Při smáčení povrchu začínají atomy roztavené pájky působit chemicko-fyzikálními silami na atomy spojovaného materiálu. Během pájení atomy roztavené pájky přecházejí do mřížky tuhého povrchu a vytváří se kovová vazba. Tudíž je zapotřebí, aby byl povrch čistý, bez nečistot a mastnoty, které by zabraňovaly roztečení pájky po povrchu a vytvoření kvalitního spoje.

Předpoklady smáčivosti povrchu pájkou:

- Složení a vlastnosti pájky
- Povrchová úprava substrátu, morfologie povrchu, materiál substrátu
- Složení a aktivita tavidla
- Povrchová úprava vývodu součástky, morfologie povrchu, materiál součástky
- Pájecí proces, definované teplotně časové charakteristiky a parametry zajišťující přenos tepla k pájenému spoji
- Pájecí atmosféra [14]

4.2 Druhy smáčení povrchu

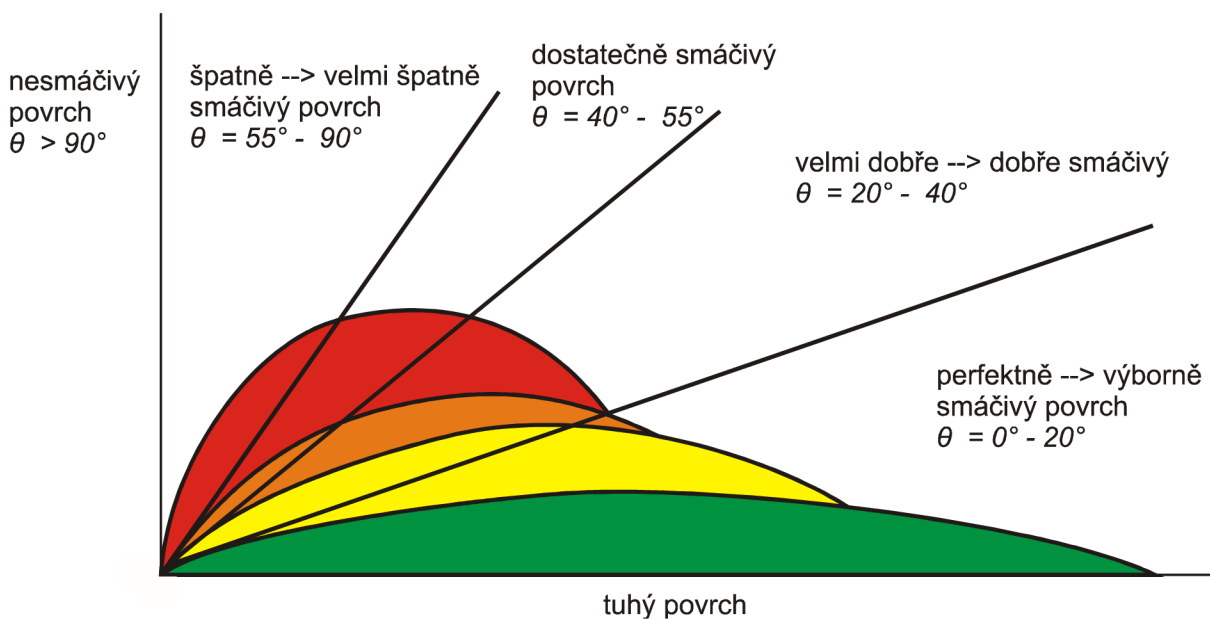
Při procesu smáčení se může nebo nemusí na rozhraní povrchu objevit chemická reakce. Potom tedy rozlišujeme dva druhy smáčení a to chemické nebo fyzikální.

Chemické smáčení – procesem rozpouštění nebo difúze vzniká společná fáze na rozhraní liquidu a solidu, to znamená, že se na rozhraní vytvoří intermetalická vrstva určité tloušťky. Vzájemná rozpustnost kovů může být nepatrná.

Fyzikální smáčení – jedná se o adhezní spoj. Pokud je pájecí ploška vystavena roztavené pájce, tak v místě kontaktu nevzniká intermetalická vrstva a nedojde ke změně chemického složení. Spoj je pak méně pevný jak ve stříhu, tak ve smyku, ale má dobrou elektrickou vodivost. [13]

4.3 Smáčecí úhel

Smáčivost je vyjádřena faktorem roztékavosti – tzv. kontaktním úhlem (Obr. 4.1)



Obr. 4.1: Znárodnění jednotlivých kontaktních úhlů, původ z [15]

Smáčivý povrch – pájka pokrývá celý povrch. Čím víc je povrch hladší, rovnoměrnější a menší tloušťka pájky, tím je proces smáčení kvalitnější.

Částečně smáčivý povrch – pájka místy nepokrývá povrch. Na povrchu jsou oblasti, které jsou smáčivé a nesmáčivé.

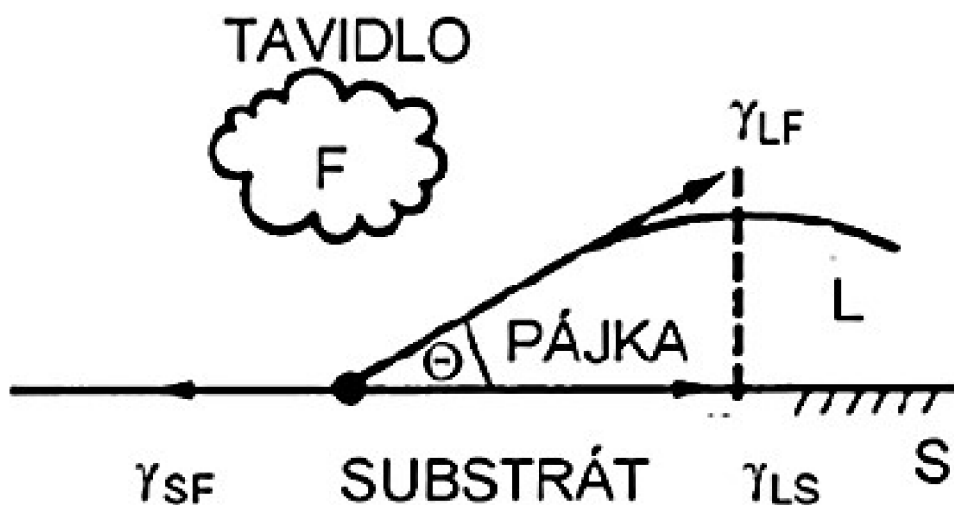
Nesmáčivý povrch – pájka nepokrývá povrch. Nesmáčivost je způsobena velkou vrstvou oxidů a málo aktivním tavidlem.

Odsmáčivý povrch – pájka ze začátku smočila povrch, ale poté vytvořila kuličku. Rovnováha procesu smáčení je na obr. 4.2 a k ní se vztahuje následující Youngova rovnice

$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} + \gamma_{LF} \cos \theta, \quad (1)$$

ve kterém F představuje tavidlo a prostředí, L pájku, S znázorňuje substrát, θ značí smáčecí úhel [°], dále jsou znázorněna povrchová napětí na jednotlivých rozhraních:

- γ_{LF} – povrchové napětí na rozhraní LF [Nm^{-1}]
- γ_{SF} – povrchové napětí na rozhraní SF [Nm^{-1}]
- γ_{LS} – povrchové napětí na rozhraní LS [Nm^{-1}]



Obr. 4.2: Rovnováha procesu smáčení, původ z [14]

Rovnice nám tedy říká, že čím menší je povrchové napětí na rozhraní tavidlo/vzduch/pájka a čím větší je povrchové napětí na rozhraní povrch/tavidlo, tím je vyšší smáčivost povrchu. [14]

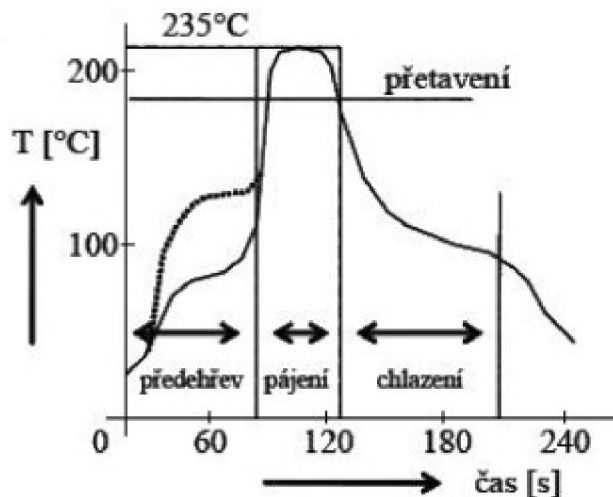
5 PÁJENÍ V PARÁCH (VAPOUR PHASE SOLDERING)

Pájení v parách neboli kondenzační pájení je jednou z nejlepších metod pájení a to hlavně díky rozložení teploty. Tuto metodu vynalezl Dr.Pfahl v roce 1974 ve firmě Western Electric. V počátcích této metody se objevovaly určité nevýhody tohoto typu pájení, např. vysoký nárůst teploty, v podstatě nemožnost jakkoliv měnit teplotní profil a vysoká cena. Proto bylo pájení v parách omezeno jen na určité aplikace. V posledních letech se tato metoda začala znovu používat a to hlavně díky novým technologiím a novým strojům, ale především kvůli používání bezolovnatých pájek, u kterých se kvůli vysokým teplotám přetavení dostáváme až na horní hranici teplotní odolnosti součástek. Jelikož se jedná o páru, tak je teplota v celém prostoru, který je parou vyplněn stejná, avšak ne větší než 230°C, tudíž nedochází k lokálnímu přehřátí desky. Pájení pouzder BGA v konvekční peci se potýká s problémem, že vnitřní kuličky pouzdra jsou špatně zapájeny kvůli nedostatečnému prohřátí a tak se musí zvýšit teplota, což může způsobit přehřátí součástky a delaminaci povrchu, proto je výhodné k pájení použít páru. Další důležitou výhodou pájení v parách je fakt, že v pájecí atmosféře není přítomen kyslík a tak nedochází k oxidaci pájeného povrchu. [16]

5.1 Teplota procesu

Aby byla zajištěna dostatečná kvalita pájených spojů, teplota par se pohybuje těsně nad bodem tavení použité pájecí slitiny.

Dříve používaná olovnatá pájka SnPb, dnes už jen omezeně, má teplotu tavení přibližně 183°C. Při pájení olovnatých pájek se používá médium, které má teplotu varu 200°C. Pro snížení toxicity při výrobě se začaly používat pájky bez olova s příměsemi stříbra a mědi, které svoji teplotou přetavení značně převyšují pájky na bázi olova. Proto bylo zapotřebí upravit výrobní proces tím, že se desky musí před procesem přetavení předehřívat, aby nedocházelo k poškození součástek a k deformaci desky z důvodu teplotního šoku. A to ne jenom u pájení v parách, ale i u pájení vlnou nebo konvekční pecí. Pro bezolovnaté pájky jako např. SAC305 s teplotou přetavení přibližně 218°C se používá kapalina s varem při 230°C. [16]

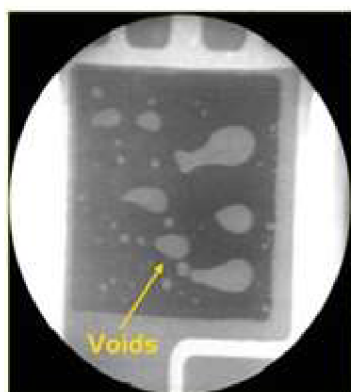


Obr. 5.2: Teplotní profil pájení v parách, původ z [19]

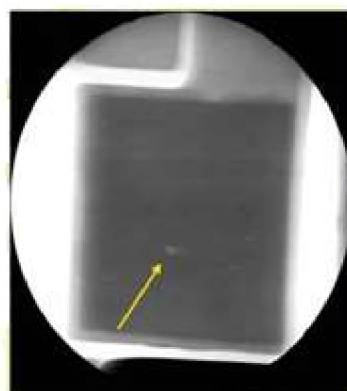
5.3 Vylepšení procesu pájení

Aby se zlepšila spolehlivost a kvalita vytvořeného pájeného spoje a zamezilo se výskytu dutin ve spoji tzv. „voidů“, které se u olovnatých pájek nevyskytovaly tak často a po přechodu na bezolovnaté pájení se tento problém stal častějším, tak se musí tento problém řešit přidáním další výrobního kroku. U pájení v parách se tento problém řeší tak, že v okamžiku kdy je pájecí pasta přetavena, tak se z komory pomocí vakuové pumpy odsaje pára a vznikne vakuum o hodnotě cca 10-20 mbar. Tím se odsaje vzduch z dutin a vznikne tak kvalitní spoj. Ovšem celá tato metoda něco stojí a celkově se z pájení v parách stává drahá, ale spolehlivá záležitost. Na obr. 5.3 je znázorněna zapájená plocha s a bez použití vakua. [18]

Zapájená plocha bez vakua



Zapájená plocha s vakuem



Obr. 5.3: Zapájená plocha bez a s použitím vakua [18]

5.4 Kapalina (médium)

V počátcích pájení v parách se používaly toxické materiály. Prvotní provedení pájecí komory bylo rozděleno na dvě části. První část byla určena pro přehřev desky na teplotu desky přibližně 50°C a byla vyplněna freonem. Ve druhé části, kde probíhalo pájení, byla jako médium použita těkavá kapalina.

V dnešní době už používáme kapaliny natolik stabilní, že neobsahují freony a není zapotřebí, aby se komora dělila na dvě části. Jako kapalina pro vypařování se používá perfluoropolyeter (PFPE). Je to inertní kapalina, která není toxická vůči svému okolí. Je nehořlavá, chemicky a teplotně stabilní, kompatibilní s různými materiály (neleptá a neznečišťuje). Velkou nevýhodou této kapaliny je její cena, proto je dobré při procesu pájení zamezit jejímu úniku. Také se postupně znečišťuje tavidlem, což má neblahý vliv na čistotu pájení a je poté potřeba kapalinu vyměnit.

Vyrábí se v různých variantách pro různý bod varu. Tuto kapalinu vyrábí např. firma Galden® pod označením:

Pro pájení olovnatých pájek:

LS200 s maximální teplotou pro pájení 200°C

LS210 s maximální teplotou pro pájení 210°C

LS215 s maximální teplotou pro pájení 215°C

Pro pájení bezolvnatých pájek:

LS230 pro pájení SAC pájek

XS235 pro pájení Sn100C pájek

HS240 pro pájení SnPb pájek

V případě, že neznáme druh pájky, např. kuliček u pouzdra BGA, tak se doporučuje použít kapalinu s bodem varu 235°C (XS235), která představuje kompromis pro pájení bezolvnatých pájek. [16] [20]

6 METODA MĚŘENÍ SSBA (SESSILE SOLDER BALL ALIGNMENT)

Jako jedna z nejjednodušších metod na měření smáčivosti povrchu pájeného materiálu se používá metoda SSBA (Sessile Solder Ball Alignment). Jak z názvu vyplývá, jedná se o metodu, kdy se použije kulička pájky a usadí se do tavidla na pájené plošce. Tavidlo je zapotřebí z toho důvodu, aby se odstranily oxidy na pájené ploše a hlavně, aby kulička držela na svém místě při posouvání materiálu do pájecí komory. Pájená ploška musí být dostatečně velká, aby se tavidlo nebo pájka po procesu přetavení nerozteklo až k okraji. Smáčivost materiálu se určuje podle výsledného smáčecího úhlu a jakosti přetavené pájky, která je definovaná průměrem, čistotou spoje a tavidlovými zbytky. [21]

Po provedení několika testů se naměřené hodnoty smáčecích úhlů pod mikroskopem porovnají a vyhodnotí. Důležitou hodnotou při tomto měření je smáčecí síla, kterou vypočteme pomocí vzorce

$$F = p\gamma \cos \theta, \quad (2)$$

kde F je smáčecí síla [N], p je obvod roztavené kuličky [m], γ reprezentuje povrchové napětí roztavené pájky [Nm^{-1}] a θ značí smáčecí úhel [°]. [23]

Při výpočtu smáčecí síly tedy platí, čím větší je obvod roztečené pájky, tím je větší smáčecí síla. Pokud se hodnota smáčecího úhlu θ blíží k nule, tak smáčecí síla dosahuje svého maxima. Povrchové napětí je během měření konstantní a nijak více výsledek neovlivňuje. Pokud není napsané v datovém listu použité pájky, je třeba ho zjistit pomocí testu. Testování bude probíhat téměř totožně jako metoda SSBA, ale nebude už použito tavidlo a jako substrát se použije křemíkový wafer. Vzorec je založen na základě Young-Laplacovy rovnice, kde povrchové napětí závisí na výšce roztečené pájky a úhlu smáčení

$$\gamma = \frac{\rho gh^2}{2(1 - \cos \theta)}. \quad (3)$$

Ve vzorci γ vyjadřuje povrchové napětí roztavené pájky [Nm^{-1}], ρ hustotu pájky [kg/m^3], h znázorňuje výšku roztečené pájky [m] a θ smáčecí úhel [°]

Výsledné povrchové napětí pájky, v našem případě SAC405, by se mělo pohybovat od 500 do 1000 mNm^{-1} . [22]

7 PRAKTICKÁ ČÁST

Jako testovací vzorky byly vybrány DPS FR4 s povrchovou úpravou HAL, ENIG, OSP, imerzní cín a také solární články s povrchovou úpravou, která byla vytvořena nanesením pasty na bázi stříbra a vytvrzena. Důležitým faktorem pro výběr testovacích vzorků byla velikost pájecích plošek větších než 3x3 mm. Dalším faktorem byl počet plošek, a to více jak 40. Posledním požadavkem bylo, aby testovací vzorky byly nově vyrobené. Testovací vzorky o těchto specifikacích vyrobené 1.-5. března 2016 byly zaslány firmou Pragoboard s.r.o. Před nanesením tavidla byly tyto vzorky očištěny isopropyl alkoholem.

7.1 Tavidlo

Byla testována dvě tavidla na různých bázích. Jako první tavidlo bylo použito pastovité tavidlo značky Kester TSF – 6592. Jedná se o bezoplachové tavidlo vhodné pro flip-chip aplikace, ball attach, opravy CSP, BGA a SMD. Bylo navrženo pro bezolovnaté pájení. Jeho složení je kalafuna, terpineol a malé množství kyseliny jantarové. Jako druhé bylo testováno kapalné tavidlo taktéž od firmy Kester 979. Také se jedná o bezoplachové tavidlo, které nijak neovlivňuje masku nebo substrát DPS. Jeho složení je na bázi organické kyseliny bez obsahu halidů. Toto tavidlo se ukázalo jako nevhodné pro proces pájení v parách, protože pokud se na víku komory nakondenzuje dostatečně velká kapka kapaliny, která poté spadne na vzorek, tak tavidlo smyje. Tudíž pro měření vzorků bylo zvoleno pastovité tavidlo, které tomuto jevu více odolává.

Tavidlo bylo nanášeno přes měděnou šablonu o velikosti otvoru 1 mm a tloušťce 0,15 mm. Pro vypočtení teoretického objemu naneseného tavidla byl použit vzorec

$$V_{teor} = \pi r^2 d, \quad (4)$$

kde r představuje poloměr otvoru v šabloně a d tloušťku šablony. Po dosazení hodnot dostáváme teoretický objem naneseného tavidla a to $V_{teor} = 0,118 \text{ mm}^3$. Ovšem reálné hodnoty se mohou lišit, protože i přes snahu držet úhel, rychlost a tlak stěrky se nemuselo natisknutím tavidla dosáhnout požadovaného objemu. Navíc je možné, že určitá část tavidla zůstala na vnitřní straně otvoru šablony.

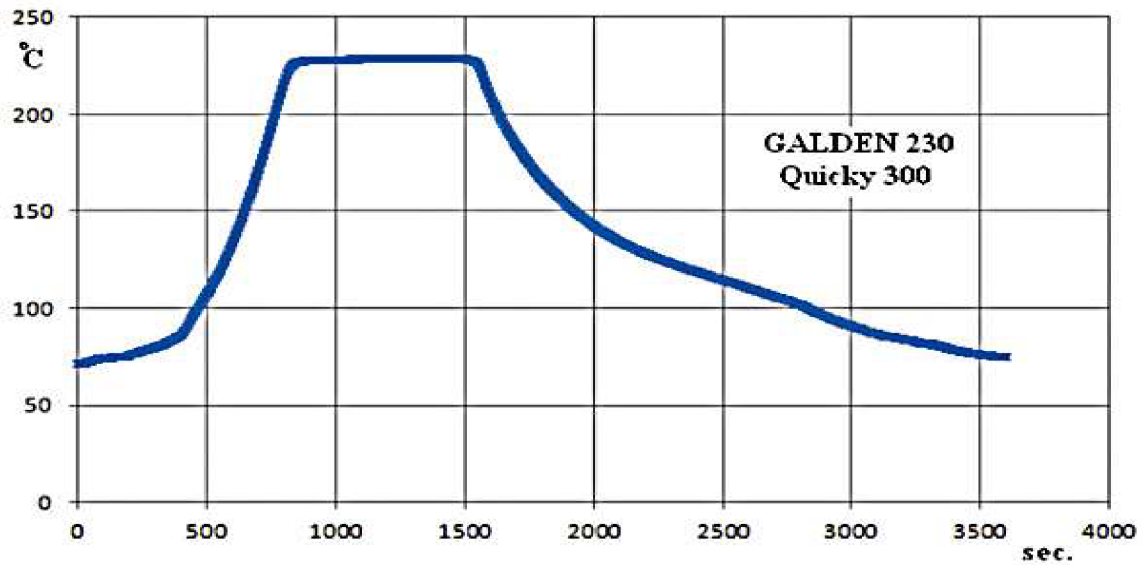
7.2 Pájka a proces přetavení

Po nanesení tavidla byla do tavidla usazena kulička pájky SAC 405 (Sb 95,5%, Ag 4% Cu 0,5%) o velikosti 20mils (0,51 mm) co nejvíce do středu plošky, aby se neroztekla do krajů, pro snadnější rozlišení obvodu roztečené kuličky.



Obr. 7.1: Nanesené tavidlo a usazená kulička na plošce ošetřené imerzním cinem

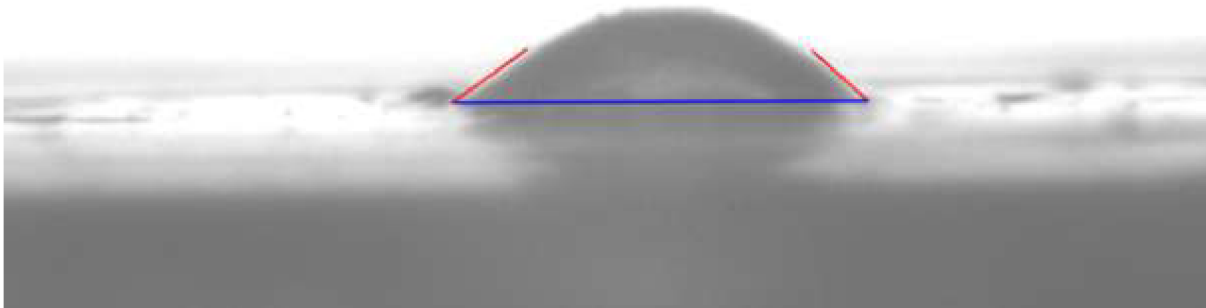
Samotný proces pájení probíhal na zařízení Quicky 300 od firmy ASSCON. Jedná se o vsázkové zařízení s roštem o velikosti 300x300 mm pro vertikální posun desky do oblasti s primární párou. Pro bezolovnaté pájení byla použita kapalina GALDEN 230 s bodem varu 230 °C. Na obr. 7.2 je uveden teplotní profil této kapaliny. Před pájením je potřeba do zásobníku v zařízení nalít destilovanou vodu pro ochlazení par na konci pájecího procesu. Před vložením osazených desek do zařízení je potřeba zařízení zahřát jedním procesem pájení “naprázdno“.



Obr. 7.2: Teplotní profil kapaliny GALDEN 230, původ z [24]

Tento postup se na každém vzorku opakuje 3x, aby projevily rozdíly smáčivosti po jednotlivých teplotních cyklech. Před každým nanesením tavidla jsou vzorky důkladně očištěny od nečistot a zbytků tavidla.

Poté byl pod mikroskopem pomocí příslušného softwaru změřen obvod rozteklé kuličky pájky a dalším mikroskopem určeným pro měření smáčecího úhlu změřen úhel rozteklé kuličky. Smáčecí úhel byl měřen manuálně čtyřbodovou metodou, jelikož software byl stavěn na měření smáčecího úhlu kapalin. Obvod byl měřen taktéž manuálně třibodovou metodou. Podle vzorce pro vypočet smáčecí síly (2) je zapotřebí znát povrchové napětí roztavené pájky, to se ale zanedbá, protože je u každého vzorku stejné, tudíž hlavní rozdíly smáčecí síly určují obvod a smáčecí úhel. A tak platí, že čím větší obvod a menší smáčecí úhel, tím je větší smáčecí síla.



Obr. 7.3: Měření smáčecího úhlu čtyř bodovou metodou

8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

8.1 HAL

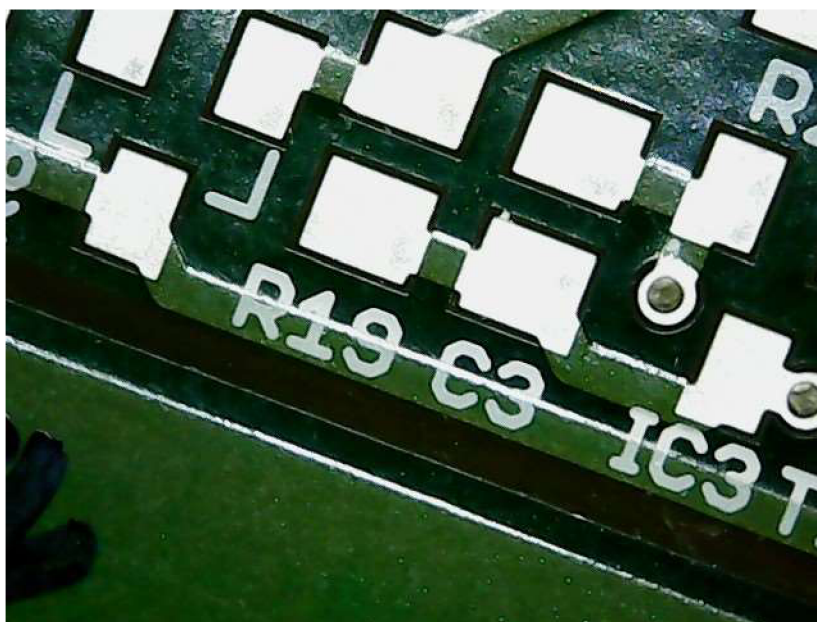
Povrchová úprava HAL dosáhla nejlepších výsledků jak smáčecího úhlu, tak obvodu roztečené kuličky. U prvního průchodu byly smáčecí charakteristiky perfektní, povrchová úprava HAL měla nejmenší smáčecí úhel a největší obvod. Smáčivost u druhého a třetího průchodu se jen minimálně zhoršila a měla v průměru téměř stejné hodnoty. Komplikací při odečítání smáčecího úhlu byla nerovnost povrchové úpravy. Po prvním průchodu povrchová úprava výrazně zoxidovala, stala se matnou a zbledla (viz obr. 8.1).

Tab. 1: Smáčecí úhly rozteklé kuličky pájky na povrchu HAL

HAL	1. průchod (°)	2. průchod (°)	3. průchod (°)
Vzorek 1	8,95984	12,1599	8,98541
Vzorek 2	11,6622	11,427	15,80527
Vzorek 3	12,46487	12,77836	14,83699
Vzorek 4	6,51862	16,34392	14,07549
Vzorek 5	14,58393	16,58992	16,33452
Vzorek 6	9,98603	13,89009	14,87764
Vzorek 7	12,44619	14,35677	12,4623
Vzorek 8	10,03434	13,21049	15,73968
Vzorek 9	15,94392	13,74052	16,17749
Vzorek 10	15,20633	18,84449	16,14458
Vzorek 11	7,89557	19,32144	16,49537
Průměr	11,42744	14,78753636	14,72134

Tab. 2: Velikost obvodu rozteklé kuličky pájky na povrchu HAL

HAL	1. průchod (μm)	2. průchod (μm)	3. průchod (μm)
Vzorek 1	5748	4621	4057
Vzorek 2	5917	4170	4057
Vzorek 3	6255	4170	4395
Vzorek 4	6199	3945	3719
Vzorek 5	5973	4226	4114
Vzorek 6	5748	3719	4170
Vzorek 7	6086	4508	3775
Vzorek 8	6086	3832	3945
Vzorek 9	5353	4733	4564
Vzorek 10	5241	3888	3832
Vzorek 11	6029	4508	4114
Průměr	5875,91	4210,91	4067,45



Obr. 8.1: Zoxidované pájecí plošky HALu

8.2 OSP

Povrchová úprava OSP měla výrazně horší smáčecí charakteristiky než HAL, které se postupně zhoršovaly. Nicméně hodnoty úhlů patří stále do kategorie dobré smáčivosti. S postupujícími průchody plošky mírně tmavly.

Tab. 3: Smáčecí úhly rozteklé kuličky pájky na povrchu OSP

OSP	1. průchod (°)	2. průchod (°)	3. průchod (°)
Vzorek 1	24,97397	28,07779	32,95739
Vzorek 2	26,26875	25,23301	33,0818
Vzorek 3	28,99927	25,00876	26,60608
Vzorek 4	29,59651	28,99233	31,64126
Vzorek 5	33,1572	24,93491	35,37688
Vzorek 6	28,71929	29,51807	32,33258
Vzorek 7	26,30224	30,15839	30,28811
Vzorek 8	29,33412	28,48681	32,77386
Vzorek 9	29,81115	27,06374	31,06061
Vzorek 10	30,47003	27,97795	32,91796
Průměr	28,763253	27,545176	31,903653

Tab. 4: Velikost obvodu rozteklé kuličky pájky na povrchu OSP

OSP	1. průchod (μm)	2. průchod (μm)	3. průchod (μm)
Vzorek 1	3301	3112	2876
Vzorek 2	3206	3112	2923
Vzorek 3	3112	3159	2829
Vzorek 4	3159	3254	3206
Vzorek 5	3112	3254	3018
Vzorek 6	3159	3206	2829
Vzorek 7	3206	3065	2971
Vzorek 8	3065	3065	3159
Vzorek 9	3206	2876	2971
Vzorek 10	3159	3112	2971
Průměr	3168,50	3121,50	2975,30

8.3 Imerzní cín

Velikosti smáčecího úhlu u povrchové úpravy imerzní cín byly velice podobné jako hodnoty u povrchové úpravy HAL, avšak při druhém průchodu se výrazně zhoršily, v průměru až o 20°, stále se však jedná o dobrou smáčivost. Na ploškách nebyly pozorovány žádné vizuální rozdíly od prvního průchodu.

Tab. 5: Smáčecí úhly rozteklé kuličky pájky na povrchu imerzního cínu

Im. cín	1. průchod (°)	2. průchod (°)	3. průchod (°)
Vzorek 1	8,12793	34,08689	34,32891
Vzorek 2	13,21889	27,86241	30,6625
Vzorek 3	9,96413	32,87048	23,43499
Vzorek 4	6,7016	25,50301	31,96966
Vzorek 5	15,48625	24,24299	29,41281
Vzorek 6	11,70566	31,14084	28,13171
Vzorek 7	11,68476	38,88749	31,98952
Vzorek 8	19,98753	30,43655	31,14103
Vzorek 9	10,42846	30,99339	27,6271
Vzorek 10	10,05463	29,58117	30,94221
Vzorek 11	9,7112	29,60398	27,8541
Vzorek 12	12,50723	38,63112	26,32735
Průměr	11,6315225	31,15336	29,4851575

Tab. 6: Velikost obvodu rozteklé kuličky pájky na povrchu imerzního cínu

Im. cín	1. průchod (μm)	2. průchod (μm)	3. průchod (μm)
Vzorek 1	4508	3043	3099
Vzorek 2	4846	2310	2818
Vzorek 3	4508	2761	3381
Vzorek 4	4452	2536	3268
Vzorek 5	5128	2930	3099
Vzorek 6	3606	2930	3156
Vzorek 7	3832	2874	2987
Vzorek 8	4339	2479	2761
Vzorek 9	5184	2648	2966
Vzorek 10	4452	2874	3212
Vzorek 11	4733	4170	2705
Vzorek 12	3775	2705	3437
Průměr	4446,92	2855,00	3074,08

8.4 Solární články

Tato povrchová úprava na bázi stříbra se ukázala jako nejméně smáčivá ze všech testovaných vzorků, i když se tyto smáčecí úhly dají považovat za dobře smáčivé. Během pájení v parách zůstávalo na těchto vzorcích nejvíce kapaliny a to z důvodu pórovitosti povrchu vzorku (viz obr. 8.2). Dále byly některé plošky mírně poškozené, proto jsou rozdíly mezi jednotlivými vzorky.

Tab. 7: Smáčecí úhly rozteklé kuličky pájky na povrchu solárního článku

Solar.	1. průchod (°)	2. průchod (°)	3. průchod (°)
Vzorek 1	24,80075	31,75589	53,70931
Vzorek 2	21,38571	35,2746	38,44596
Vzorek 3	20,51922	19,69756	28,41042
Vzorek 4	38,03288	54,40228	30,1252
Vzorek 5	32,64671	29,36083	37,55613
Vzorek 6	33,98549	28,527	22,85164
Vzorek 7	30,55199	33,98916	20,93291
Vzorek 8	23,65849	29,7523	28,77409
Vzorek 9	44,92843	29,4094	53,10748
Vzorek 10	29,55311	52,91581	26,5938
Průměr	30,006278	34,508483	34,050694

Tab. 8: Velikost obvodu rozteklé kuličky pájky na povrchu solárního článku

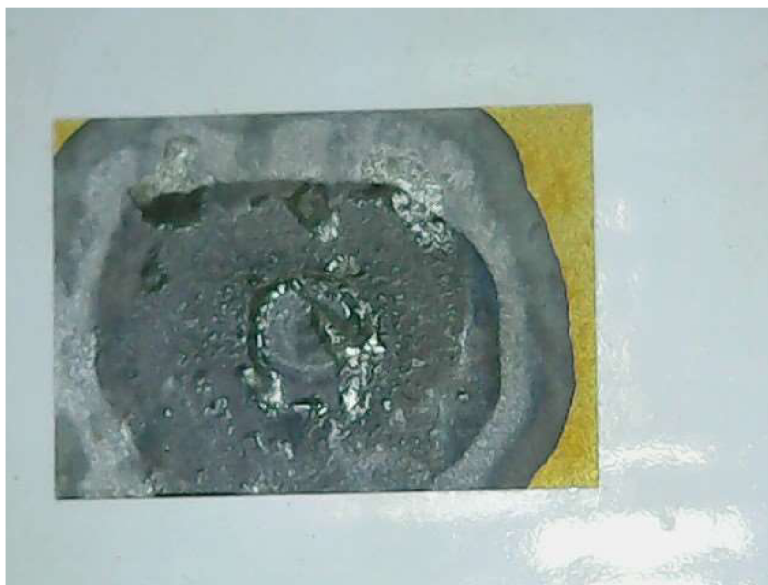
Solar.	1. průchod (μm)	2. průchod (μm)	3. průchod (μm)
Vzorek 1	2638	2715	2600
Vzorek 2	2523	2523	2026
Vzorek 3	2982	2600	1912
Vzorek 4	1720	2179	2026
Vzorek 5	2332	2294	2753
Vzorek 6	2753	2294	2447
Vzorek 7	2867	2676	2600
Vzorek 8	2906	2103	2332
Vzorek 9	2638	2829	3097
Vzorek 10	2944	2370	2523
Průměr	2630,30	2458,30	2431,60



Obr. 8.2: Solární článek (vpravo a vlevo jsou pájecí plošky)

8.5 ENIG

Povrchovou úpravu ENIG se nepodařilo vyhodnotit z důvodu, že zlato difunduje do pájky. Byla testována různá tavidla v domněnání, že jsou příliš agresivní a narušují strukturu povrchové úpravy, ale výsledky byly stále stejné. Poté bylo vyzkoušeno roztečení kuličky, když deska byla umístěna na hot-platu. Po více jak minutě, kdy se kulička roztekla, se začala projevovat difuze. Jelikož podle teplotního profilu kapaliny (obr. 7.2) trvá nejvyšší teplota v komoře kolem 12,5 minut, tak v podstatě veškeré zlato na plošce difunduje do pájky a pak nelze rozeznat obvod a smáčecí úhel rozteklé kuličky.



Obr. 8.3: Ploška povrchové úpravy ENIG po procesu pájení

8.6 Chyby měření

Aby byly výsledky kompletní, je potřeba brát v potaz následující faktory.

Největší faktor, který mohl ovlivňovat výsledky, byla znečištěná kapalina. Její páry mohly ovlivnit jak povrchovou úpravu, tak funkci tavidla. Tekutina byla znečištěna z velké části tavidlem, tudíž páry mohly působit na některé povrchové úpravy agresivně. Tavidlo může být těmito parami ředěno nebo ovlivněno takovou měrou, že nebude dostatečně zajišťovat svoji funkci pro smáčení povrchu.

Dalším faktorem je nepřesnost měření obvodu a kontaktního úhlu. Protože vzorky byly měřeny manuálně, hrál zde také roli lidský faktor.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo provést studii problematiky pájení v parách a provést měření smáčivosti jednotlivých povrchových úprav po několika pájecích cyklech.

V první kapitole jsou shrnuty jednotlivé povrchové úpravy pájecích plošek. Ze studie a zhodnocení jednotlivých povrchových úprav by pro pájení v parách měly mít nejlepší výsledky povrchové úpravy s imerzním cínem a povrchovou úpravou ENIG. Naopak nejhorší výsledky se očekávají od povrchové úpravy OSP, protože nevydrží několikanásobný teplotní proces, který je zapotřebí k porovnání několika výsledků.

V dalších kapitolách jsou shrnuty jednotlivé požadavky na tavidla a bezolovnaté pájky, s tím, že je blíže popsána SAC pájka, která se byla použita k testování. Je to hlavně z toho důvodu, že je vhodnější pro pájení přetavením a obsahuje stříbro, které s narůstajícím procentem ve slitině značně ovlivňuje roztékavost pájky.

Dále se rozebírá problematika pájitelnosti, smáčivosti a smáčecích úhlů. V testování je snaha dosáhnout co nejmenšího smáčecího úhlu, který byl u jednotlivých povrchových úprav porovnáván.

Následně je podrobněji probrán princip pájení v parách, včetně pracovního postupu, výhod a nevýhod tohoto druhu pájení. Při testování bylo zapotřebí dávat si pozor na únik nebo nadměrné znečištění kapaliny z důvodu její ceny. Samotné testování smáčivosti různých povrchových úprav probíhalo na zařízení od firmy ASSCON Quicky 300, jehož velikost je plně dostačující pro tento experiment.

Smáčivost se testovala metodou SSBA. Pro testování byl vybrán druh kuličky pájky SAC 405 o velikosti 0,51 mm, aby nedocházelo k tomu, že se roztečená pájka dostane až k okraji pájecí plochy. Vyhodnocování probíhalo pod mikroskopem. Měřily se velikosti smáčecího úhlu a obvod roztečené kuličky pájky, které zde byly přesněji odečítány pomocí softwaru na počítači.

V praktické části je blíže popsána metoda pájení a měření. Dále jsou zaznamenány jednotlivé výsledky obvodů a smáčecího úhlů. Podle dosažených výsledků jako nejlepší povrchová úprava pro pájení v parách se jeví HAL a to při všech průchodech. Jedinou nevýhodou byla silná oxidace, která se kupodivu projevila jen minimálně na smáčecí charakteristiky. Po HALu se jako další skvělá povrchová úprava jevila povrchová úprava pomocí imerzního cínu. Ta dosahovala při prvním průchodu téměř totožných hodnot jako HAL, avšak při dalších průchodech se její smáčivost razantně zhoršila, ovšem ne do takové míry, že by povrch byl nesmáčivý, ale dosahoval obstojné smáčivosti. Další povrchová úprava OSP měla smáčivost také uspokojivou a to i při třetím tepelném průchodu. S postupujícími pájecími cykly se smáčivost mírně horšila a povrchová úprava tmavla. Povrchová úprava na solárních člancích, která je na bázi stříbra, měla ze všech testovaných vzorků nejhorší smáčecí charakteristiky. Bylo to dáno tím, že jednak nebylo známo stáří testovaných vzorků a mnohé vzorky měly mírně poškozenou povrchovou úpravu. I přes tyto neblahé vlivy si povrchová

úprava zachovala uspokojivou smáčivost. Během pájení zůstávalo na vzorcích mnohem více kapaliny než na ostatních. Proto bylo důležité po každém pájení kapalinu ze vzorků sklepat zpátky do vany v zařízení, aby nedocházelo ke zbytečnému úniku. Povrchová úprava ENIG v kombinaci s kuličkou SAC pájky se ukázala jako nevhodná pro pájení v parách z důvodu teplotního profilu kapaliny. Jelikož se při použití kapaliny GALDEN 230 drží nejvyšší teplota v zařízení kolem 12,5 minut, je to tudíž dostatečná doba na to aby zlato, které je přítomno v povrchové úpravě, difundovalo do pájky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] STARÝ, Jiří a Petr KAHLE. *Plošné spoje a povrchová montáž*. Brno: VUT v Brně, 2011. Dostupné na www: <http://docplayer.cz/2635621-Ing-jiri-stary-ph-d-ing-petr-kahle-plosne-spoje-a-povrchova-montaz.html>
- [2] SWEATMAN, Keith. *Hot Air Solder Leveling in the Lead-free Era*. [online] Osaka, Japan. [cit. 10. prosince 2015]. Dostupné na www: http://www.circuitinsight.com/pdf/hot_air_level_soldering.pdf
- [3] Saturnelectronics.com [online] *ENIG* [cit. 20. prosince 2015]. Dostupné na www: http://saturnelectronics.com/enig_final_finish
- [4] Freetronics.com [online] *PCB Surface Finishes*. Freetronics [cit. 20. prosince 2015]. Dostupné na www: <http://www.freetronics.com.au/pages/pcb-surface-finishes>
- [5] BEDLEK, Marek. *Bakalářská práce, Povrchové úpravy mědi při výrobě DPS*. Brno: FEKT VUT v Brně.
- [6] Semach.cz [online] *Povrchové úpravy*. [cit. 20. prosince 2015]. Dostupné na www: <http://www.semach.cz/pdf/povrchy.pdf>
- [7] JÍČINSKÝ, Jiří. *Bakalářská práce, Enviromentální vlivy a pájitelnost povrchových úprav desek plošných spojů*. Brno: FEKT VUT v Brně.
- [8] VÁVRA, Jan. *Diplomová práce, Studium růstu whiskerů*. Praha: ČVUT v Praze, 2014
- [9] ŠULA, Matěj. *Diplomová práce, Optimalizace procesu pájení ve výrobě přístrojových transformátorů*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2014.
- [10] STARÝ, Jiří. *Plošné spoje a povrchová montáž*. Laboratorní cvičení. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011.
- [11] PLEC, Miroslav. *Diplomová práce, Výzkum spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011.
- [12] KOTRČOVÁ, Eva [online] *Implementation of lead-free soldering technology*. ČVUT v Praze, 2011 – [cit. 20. prosince 2015]. Dostupné na www: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/kotrcova.pdf>
- [13] HARANT a STEINER [online] *Testování pájitelnosti metodou smáčekcích vah*, [cit. 20. prosince 2015], ZČU v Plzni. Dostupné na www: <https://dspace.zcu.cz/bitstream/handle/11025/392/r0c1c8.pdf?sequence=1>
- [14] STARÝ, Jiří. *Plošné spoje a povrchová montáž 2. část*. Brno: FEKT VUT v Brně. Dostupné na www: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=25509
- [15] STOKLASA, František [online] *Pájecí slitiny, 2010* - [cit. 25 ledna 2016]. Dostupné na www: <http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=6096&docGroup=177&cmd=0&instance=1>

- [16] LEICHT, Helmut a Andreas THUMM. *Today's Vapor Phase Soldering An Optimized Reflow Technology for Lead Free Soldering*. [online] – [cit. 25 ledna 2016]. Dostupné na www: <http://www.torenko.com/pdf/Todays-Vapor-Phase-Soldering-Tech-Paper.pdf>
- [17] FILÁKOVÁ, Denisa. *Bakalářská práce, Technologie pájení přetavením*. Zlín: UTB ve Zlíně, 2010. Dostupné na www: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/11540/fil%C3%A1kov%C3%A1_2010_bp.pdf?sequence=1
- [18] WEB OK2IMH [online] *Pájení v parách, 2007* - [cit. 10. února 2016]. Dostupné na www: <http://www.ok2imh.com/view.php?cisloclanku=2007040005>
- [19] SZENDIUCH, Ivan a Edita HEJÁTKOVÁ. *Skriptum, Mikroelektronika a technologie součástek – úvod do elektronického hardware*. FEKT, VUT Brno.
- [20] GALDEN® LS/HS - *Vapour phase soldering fluids*. Galden [online] – [cit. 22. března 2016]. Dostupné na www: http://www.solvay.com/en/binaries/Galden-LS-HS-Vapor-Phase-Soldering-Fluids_EN-220537.pdf
- [21] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. VUT IUM, Brno 2007.
- [22] OŽVOLD, HODÚLOVÁ, CHRIAŠTELOVÁ, JANOVEC a TURŇA. *Lead-free solders: Comparative study of thermal and wetting properties*. [online] Slovak University of Technology, 2008 – [cit. 22. března 2016] Dostupné na www: http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal_08/Lists/Papers/216.pdf
- [23] DHARMA, I Gusti Bagus Budi, Mohd Hamdi Abd SHUKOR a Tadashi ARIGA. *Wettability of Low Silver Content Lead-Free Solder Alloy*. [online] University of Malaya, Malaysia, 2009 – [cit. 22. března 2016] Dostupné na www: <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/50/05/1135.pdf>
- [24] ŠANDERA, J. *Pájení v parách – Zařízení Quicky 300 od firmy ASSCON* [online], 2013 – [cit. 5. Května 2016]. Dostupné na www: <http://www.smtplus.cz/pdf/pary1.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

DPS	Deska Plošného Spoje
HAL	Hot Air Leveling
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold
OSP	Organic Solder Preservatives
BGA	Ball Grid Array
SSBA	Sessile Solder Ball Alignment
VOC	Volatile Organic Compounds
SAC	Sn Ag Cu

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Klasifikace tavidel pro měkké pájení dle ČSN EN ISO 29454-1, původ z [10].....	11
Obr. 4.1: Znázornění jednotlivých kontaktních úhlů, původ z [15]	14
Obr. 4.2: Rovnováha procesu smáčení, původ z [14].....	15
Obr. 5.1: Schéma pájení v parách, původ z [18]	17
Obr. 5.2: Teplotní profil pájení v parách, původ z [19].....	18
Obr. 5.3: Zapájená plocha bez a s použitím vakua [18]	18
Obr. 7.1: Nanesené tavidlo a usazená kulička na plošce ošetřené imerzním cínem.....	22
Obr. 7.2: Teplotní profil kapaliny GALDEN 230, původ z [24].....	23
Obr. 7.3: Měření smáčecího úhlu čtyř bodovou metodou	24
Obr. 8.1: Zoxidované pájecí plošky HALu	26
Obr. 8.2: Solární článek (vpravo a vlevo jsou pájecí plošky).....	30
Obr. 8.3: Ploška povrchové úpravy ENIG po procesu pájení	31

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1: Smáčecí úhly rozteklé kuličky pájky na povrchu HAL	25
Tab. 2: Velikost obvodu rozteklé kuličky pájky na povrchu HAL	26
Tab. 3: Smáčecí úhly rozteklé kuličky pájky na povrchu OSP	27
Tab. 4: Velikost obvodu rozteklé kuličky pájky na povrchu OSP	27
Tab. 5: Smáčecí úhly rozteklé kuličky pájky na povrchu imerzního cínu	28
Tab. 6: Velikost obvodu rozteklé kuličky pájky na povrchu imerzního cínu.....	28
Tab. 7: Smáčecí úhly rozteklé kuličky pájky na povrchu solárního článku	29
Tab. 8: Velikost obvodu rozteklé kuličky pájky na povrchu solárního článku	29