



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

SMÁČIVOST POVRCHOVÝCH ÚPRAV DPS A POROVNÁNÍ METOD

WETTABILITY OF PCB SURFACE FINISHES AND COMPARISON OF METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Vídeňský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Ondřej Vídeňský

ID: 170837

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Smáčivost povrchových úprav DPS a porovnání metod

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku povrchových úprav desek plošných spojů a podrobněji se soustředte na imerzní cín a chemický nikl s imerzním zlatem. Zpracujte defekty související s těmito povrchovými úpravami DPS.

Navrhněte testovací DPS na provádění pravidelných výrobních testů smáčivosti s bezolovnatou pájecí slitinou SAC 305 a zpracujte návrh metodiky zkoušek.

Dle navržené metodiky proměřte smáčecí charakteristiky a proveďte vybrané zkoušky povrchových úprav testovacích DPS v různých podmínkách zrychleně stárnutých i skladovaných.

Vyhodnoťte dosažené výsledky – úroveň smáčení, roztečení pájky po povrchu i odsmačení. Porovnejte výsledky dosažené rozdílnými metodami.

Spolupráce s firmou Gatema Boskovice.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.


Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultant:




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

Tato bakalářská práce se zabývá metodami zkoušek smáčivosti povrchových úprav desek s plošnými spoji. Pro tyto testy byla navržena a vytvořena zkušební deska, která obsahovala testovací kupony pro navržené testovací metody. Desky byly vytvořeny a pokryty povrchovými úpravami firmou Gatema Boskovice. Zkouškám byly podrobeny dvě povrchové úpravy, a to chemický nikl s imerzním zlatem (ENIG) a imerzní cín. Pro simulaci pájení přetavením sloužily zkušební metody solder indicator, solder spread test a dewetting test. Simulaci pájení vlnou zde zastávala wetting balance test metoda.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with testing methods for surface finishes' wettability PCB. For this tests has been designed and created testing board which contains testing coupons for testing methods. Boards have been created and covered by surface finishes by Gatema Boskovice. In this thesis electroless nickel with immersion gold (ENIG) and immersion tin have been tested. For simulation of reflow soldering have been used test methods solder indicator, solder spread test and dewetting test. Wetting balance test method has been used as simulation of wave soldering.

KLÍČOVÁ SLOVA

Povrchové úpravy, OSP, ENIG, imerzní cín, defekty, smáčivost, odsmáčení, metoda smáčecích vah, smáčecí charakteristiky, šablonový tisk, návrh šablony, smáčecí úhel.

KEYWORDS

Surface finishes, OSP, ENIG, immersion tin, defects, wettability, dewetting, wetting balance method, wetting characteristics, stencil printing, stencil design, wetting angle.

Vídeňský, Ondřej. *Smáčivost povrchových úprav DPS a porovnání metod*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2017. 51 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Smáčivost povrchových úprav DPS a porovnání metod 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 Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Také děkuji firmě Gatema Boskovice za spolupráci a poskytnuté vzorky pro měření.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	3
1 Povrchové úpravy	4
1.1 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)	5
1.2 Imerzní cín (Immersion Tin)	5
1.3 OSP (Organic Solder Protection)	6
2 Defekty povrchových úprav	7
2.1 OSP (Organic Surface Protection)	7
2.2 Imerzní cín (Immersion Tin)	8
2.3 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)	9
3 Pájecí slitiny a pájitelnost	10
3.1 SAC 305	10
3.2 SN100C	10
3.3 SnBi	11
3.4 Pájitelnost	11
3.5 Stárnutí materiálu	12
4 Metodika zkoušek	13
4.1 Návrh DPS pro provádění pravidelných zkoušek výrobních testů	13
4.1.1 Solder indicator	13
4.1.2 Solder spread test	16
4.1.3 Dewetting test	16
4.1.4 Metody pájení přetavením	17
4.2 Metoda smáčecích vah (Wetting balance test method)	19
5 Dosažené výsledky a diskuze	22
5.1 Solder indicator	22
5.2 Wetting balance test metoda	25
5.3 Solder spread test	28
5.4 Dewetting test	31
6 Zhodnocení výsledků	34
6.1 Porovnání metod	34
6.2 Návrh pro inovaci metody solder indicator	35
6.2.1 Změna průměru otvorů v šabloně	35

6.2.2	Změna vzdálenosti otvorů.....	35
Závěr		37
Literatura		39
Seznam symbolů, veličin a zkratk		40
Seznam obrázků		41
Seznam tabulek		42
Příloha A – Testovací deska firmy Atotech		43
Příloha B – Tabulky naměřených hodnot solder indicator		44

ÚVOD

Desky s plošnými spoji (dále již DPS či desky) jsou v dnešní době stavební kámen všech elektrických zařízení. Vodivé cesty na DPS umožňuje plátovaná měď a součástky se pájí na měděné plošky, které nejsou zakryté nepájivou maskou. Měď však rychle oxiduje, a protože samotná měď nemá dobré smáčecí charakteristiky pro pájení, tak se na DPS hned po její výrobě nanáší povrchová úprava, která chrání měděné plošky proti oxidaci, korozi a zlepšuje pájitelnost. Od roku 2006 je ve většině aplikací zakázáno používat olovnaté pájky, proto přednost dostávají povrchové úpravy, které jsou více vyhovující pro bezolovnaté pájení.

Tato bakalářská práce se zabývá povrchovými úpravami a měření jejich smáčivosti. V první teoretické části se pojednává o třech typech povrchových úprav, konkrétně o imerzním cínu, chemickém niklu s imerzním zlatem (ENIG) a o OSP úpravě. U všech tří úprav jsou zhodnoceny jejich výhody a nevýhody a jsou mezi sebou porovnány. Druhá část popisuje defekty povrchových úprav, které jsou způsobeny špatným technologickým postupem nebo skladováním. Následující kapitoly obsahují pojednání o pájecích slitinách SAC 305, SN100C a SnBi, dále pak teorií pájení a teorii intermetalického stárnutí. Poslední část je popis testované DPS a návrh metodiky testů mezi které patří: metoda smáčecích vah (wetting balance method) simulující pájení vlnou, solder spread test, dewetting test a solder indicator, které simulují pájení přetavením.

V praktické části byla ve spolupráci s firmou Gatema Boskovice navržena a zhotovena testovací deska, která obsahovala kupony, pro již výše zmíněné testy. Podle navržené metodiky byly kupony testovány pájecí slitinou SAC 305, a to v podobě pájecí pasty (testy pro simulaci pájení přetavením) a pájecí lázně (testy pro simulaci pájení vlnou). Testování probíhalo hned po vyjmutí desky z obalu, a pro metodu solder indicator se provádělo navíc měření po zatížení teplotním profilem (izotermální stárnutí). Cílem práce bylo určit smáčivost povrchové úpravy imerzního cínu a chemického niklu s imerzním zlatem, porovnat tyto dvě povrchové úpravy z hlediska jejich smáčecích charakteristik a porovnat výsledky získané odlišnými metodami.

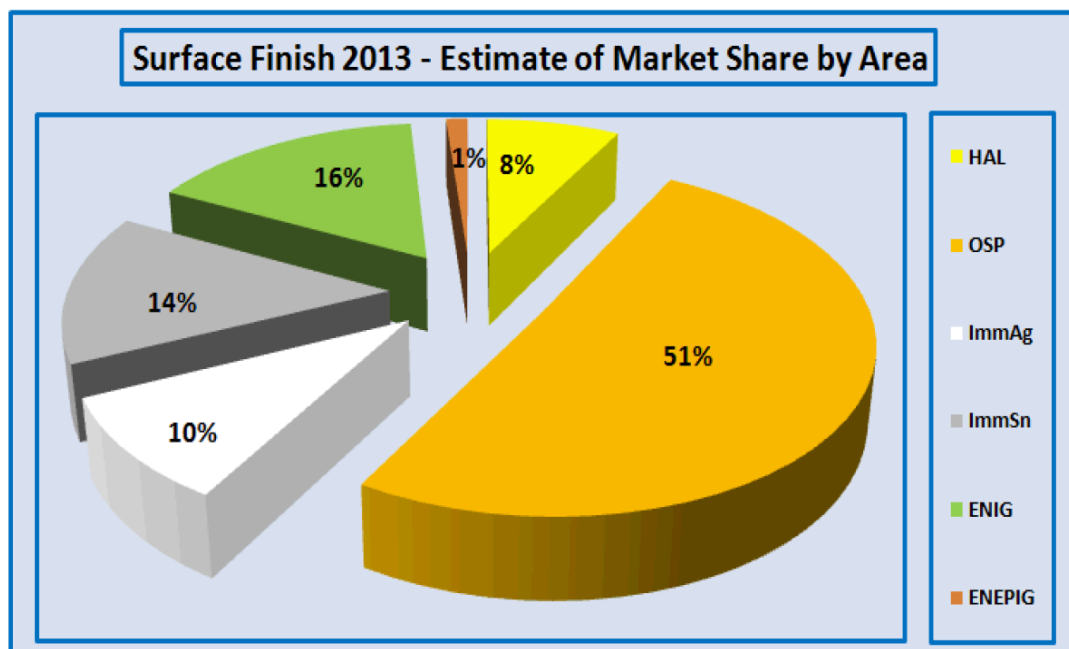
1 POVRCHOVÉ ÚPRAVY

Jako první problematiku, kterou je potřeba si uvědomit při konstrukci DPS je, že pájecí plošky jsou převážně vyrobeny z mědi. Měď je velmi dobrý vodič jak elektrický, tak i tepelný, ale velmi rychle oxiduje a koroduje, což může způsobit špatné smáčení až nesmáčení povrchu, příp. i odsmačení pájky během pájecího procesu. [1]

Proto se používají povrchové úpravy, které mají jako hlavní funkci chránit měď, která není zakrytá nepájkivou maskou, před oxidací a korozí. Neexistuje pouze jedna univerzální povrchová úprava, proto výrobce musí vždy zvážit, pro jakou aplikaci danou povrchovou úpravu použije. Kromě aplikace musí také povrchové úpravy splňovat materiálovou kompatibilitu, tedy aby došlo k chemickému a fyzickému spojení s mědí.

Při výběru povrchové úpravy se musí brát v úvahu: [2]

- vhodnost pro bezolovnaté pájení
- cena
- enviromentální kompatibilita
- doba skladovatelnosti
- tloušťka vrstvy a vodivost
- vhodnost pro fine pitch komponenty (rovinnost)
- vysokofrekvenční aplikace
- tepelná odolnost
- teplotní stres DPS pod 65 °C
- snadné nanášení a kontrola
- odolnost proti pádu



Obr. 1-1: Podíl povrchových úprav na celosvětovém trhu (převzato z [2]).

1.1 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)

Jedná se o jednu z nejlepších povrchových úprav, především díky velmi rovnému povrchu (vhodně pro fine pitch technologie) a zlatu s velkou odolností proti oxidaci, což jí propůjčuje dlouhou dobu skladovatelnosti (až 12 měsíců). Zlato je ideální prvek pro povrchové úpravy, ale velmi rychle se rozpouští do mědi a vytváří tak křehké intermetalické sloučeniny, které mají špatnou smáčivost, vodivost a pevnost. Proto se mezi zlato a měď přidává vrstva niklu. Nikl však sám o sobě rychle oxiduje, takže ochrannou funkci zde zastává pouze zlato.

Na holou měď se chemicky nanese vrstva niklu (3 – 5 μm), do které se přidá navíc příměs fosforu, který zvýší odolnost proti korozi. Dále se na nikl nanese vrstva zlata (0,05 – 0,2 μm). Při nanesení tenčí vrstvy zlata může dojít k horšení smáčecích charakteristik, stejně tak i u fosforu, pokud by na druhou stranu bylo nanášeno větší množství zlata či fosforu, může dojít ke zhoršení pájitelnosti spoje.

Pro ENIG je hlavní výhodou výše zmíněná rovnost povrchu a dlouhá doba skladovatelnosti. Dále mezi výhody patří dobrá možnost kontaktování. Jelikož se kovy nanášejí pouze chemicky a imerzně, nedochází k tepelnému šoku, jako např. u technologie HAL. Ekologické aspekty jsou velmi dobré a také naproti jiným povrchovým úpravám je zde velká teplotní stálost, tedy při několikanásobném přetavovacím cyklu úprava nedegraduje a zajišťuje větší ochranu než většina jiných povrchových úprav po teplotních cyklech. ENIG také zajišťuje velkou odolnost proti korozi díky vrstvě niklu. Jelikož se nikl nanášejí chemicky a poté se na něho imerzně nanese zlato, je vhodné pro PTH (Plated-Trough Hole) [3].

Nevýhoda u této povrchové úpravy je vyšší cena výroby, protože zlato patří mezi drahé kovy. Dále při pájení dochází k difuzi zlata do pájky a vytváří se tak intermetalické sloučeniny AuSn_4 a AuSn_2 , které mají horší elektrickou vodivost, zvyšují křehkost spoje a zmenšují její pevnost. Celkový proces je složen z jednotlivých náročných chemických procesů, to z úpravy ENIG dělá také těžko ovladatelnou techniku. U vysokofrekvenčních aplikací také musíme počítat s většími ztrátami signálu. [4]

1.2 Imerzní cín (Immersion Tin)

Jedná se o nanášení chemického cínu na měď pomocí ponoru. DPS se ponoří do kyselého bezproudového cínovací lázně, tím tak vznikne vrstva cínu velmi dobré rovinnosti o tloušťce kolem 1 μm , která chrání měď před oxidací. Naproti povrchové úpravě ENIG má imerzní cín kratší dobu skladovatelnosti, která se pohybuje se kolem 3 – 6 měsíců. Může existovat spousta možností, jak aplikovat imerzní cín, např. německá firma Ormecon využívá polyfenylamin polymerové soli, též nazývaný ormecon. Ormecon je první organický kov a je nanášen na holou měď (cca 0,08 μm) a následně ponořen do cínovací lázně, která vytvoří přibližně 0,8 μm silnou vrstvu. Organický kov zabraňuje vytvoření intermetalických sloučenin mezi mědí a cínem [5]. Tato povrchová úprava můžeme být poznána díky lesklému nebo matnému modrošedému povrchu.

Výhoda této technologie je už výše zmíněná výborná rovinnost a kompatibilita s cínovou pájkou, což jí zaručuje výbornou spolehlivost. Ekologicky je velmi vyhovující, a to za nízké náklady na výrobu. Celkový proces se jednoduše řídí a kontroluje. Jelikož se jedná o imerzní nanášení, je také eliminován tepelný šok substrátu.

Nevýhoda ovšem je velká náchylnost na nečistoty a pot, proto se s touto povrchovou úpravou musí zacházet v čistých prostředích a manipulovat s ní v ochranných rukavicích. Mezi další nevýhody patří rychlé vytváření intermetalických sloučenin mezi mědí a cínem.

Povrchová úprava je také velmi agresivní na pájecí masku a už při prvním průchodu přetavovací pecí rychle degraduje. Špatně se měří tloušťka povrchové úpravy. Jelikož se nanáší pouze imerzně, není vhodné pro PTH (Plated-Trough Hole). U imerzního cínu se také musí počítat s možností vytvoření tzv. whiskerů (viz. následující kapitola).

1.3 OSP (Organic Solder Protection)

OSP je chemická metoda, kdy jsou chemicky nanášeny na odhalenou měď organické inhibitory oxidace mědi. Používají se látky na bázi benzoimidazolů. Na povrchu mědi drží pomocí Van der Waalových sil, takže nevznikají intermetalické sloučeniny mezi mědí a povrchovou úpravou a nedochází tak k toxikaci pájeného spoje.

Mezi výhody patří levná výroba, výborná rovinnost povrchu a ekologická nezávadnost. OSP je také výborné pro bezolovnaté pájení a pro pájení speciálních slitin. Svou spolehlivostí se vyrovná dříve oblíbené HAL úpravě a dosahuje 1/4 až 1/2 její ceny, má tak tedy velmi velký potenciál do budoucna povrchových úprav a dostává se na přední příčky nejpoužívanějších povrchových úprav. Proces nanášení je velmi jednoduchý, krátký a kontrolovatelný. Při špatném nanesení se dá lehce předělat (re-workable).

Nevýhoda ovšem je krátká doba skladovatelnosti (max. 6 měsíců), nevhodnost pro fine pitch technologie a malá tepelná odolnost, vydrží maximálně dvojnásobný teplotní cyklus [4]. Při průchodu přetavovací pecí rychle degraduje. Není vhodné pro PTH a ICT (in-circle test). Těžko se zjišťuje tloušťka vrstvy a pouhým okem lze těžko rozpoznat, zdali je vrstva nanášena. Také tloušťka vrstvy se pohybuje kolem 0,5 μm a jedná se tak o nejtenčí povrchovou úpravu [6]. Protože je OSP na vodní bázi, je také lehce odstranitelná vodou, tedy při smytí např. tavidla nebo při velké vlhkosti dochází k uvolnění vazeb, a tedy k degradaci povrchu, což může způsobit nesmáčivost. Degradaci povrchu může také způsobit vysoká teplota, kdy energie z tepla uvolňuje vazby.

Do nové generace skupiny OSP patří i technologie GLICOAT F2, kterou vyrábí firma Shikoku Chemical Corporation v Japonsku [7]. Inhibitor oxidace je velmi odolný teplu díky vysoké molekulové hmotnosti aryl-phenyl-imidazolového řetězce. Vazby k mědi jsou tvořeny vodíkovými vazbami, které jsou silnější, než Van der Waalovy síly, dochází však k omezenému rozpouštění Cu do roztoku nebo u verze F2(LX) k ní nedochází vůbec, může se tak použít i pro organický film pro ENIG nebo jiné kovy. Povlaky dosahují tloušťky 0,1 – 0,2 μm . [7]

Další skupinou OSP je tzv. MECSEAL CL5018, jedná se o teplovzdornou chemickou sloučeninu, která je dobře rozpustná ve vodě. V porovnání s alky-imidazolovými řetězci je méně pěnivá a nabízí vynikající tepelnou odolnost a smáčení při pájení. Protikorozi vrstva je tvořena pouze na povrchu mědi a díky lehké kontrole zaručuje výborné zpracování a bezpečnost. [7]

2 DEFEKTY POVRCHOVÝCH ÚPRAV

Pro povrchové úpravy je velmi důležité, stejně jako pro všechny fáze výroby DPS, dodržet správný pracovní postup při nanášení, ale také je velmi důležité je skladovat ve správných podmínkách. Proto je potřeba vždy vědět, jak každou úpravu správně skladovat, aby nedošlo k degradaci ochrany povrchu. Tato kapitola popisuje jednotlivé defekty různých povrchových úprav, jak z hlediska výroby, tak z hlediska skladovatelnosti.

Při skladování se musí dodržovat 3 základní body:

- Teplota
- Vlhkost
- Čas

2.1 OSP (Organic Surface Protection)

I přestože je OSP velmi levná a jednoduchá metoda, která pomalu nahrazuje dříve velmi rozšířenou metodu HAL, pořád nemůže nahradit všechny povrchové úpravy. Důvodem je její organické složení, a tedy její velká citlivost na vnější vlivy, které tolik neovlivňují povrchové úpravy z kovu.

V prvním případě musí být povrch mědi dokonale očištěn. Jakmile se OSP nanese na znečištěný povrch, dojde k prudkému poklesu absorpce povlaku, a tedy k nedostatečné ochraně mědi, což může způsobit nesmáčivost povrchu. Pro in-line systémy je kritické, aby přepravní pásy byly velmi čisté. OSP by se mohla během přepravy vysušit nebo znečistit od přepravníku a jeho tloušťka se tak snížila, což by mohlo způsobit oxidaci nebo nesmáčivost povrchu.

Lázeň OSP musí mít po celou dobu stálou a vhodnou hodnotu pH. Při zvýšení pH hodnoty se sice zvýší tloušťka naneseného povlaku, ale lázeň se stává nestabilní. [2]

Velkým problémem je nanesení homogenní tloušťky povlaku. Kritická je hodnota tloušťky naneseného povlaku, pokud je příliš velká, je povlak nevhodný pro vyplňování pokovených otvorů pomocí pájecí pasty. Po přetavení se pájka kvůli velké tloušťce povlaku špatně navzlíná a otvor tak není vyplněn alespoň v 75 %, jak je uvedeno v normě IPC A 610.

Při skladování je OSP nejvíce citlivá na vlhkost. Kvůli své organické bázi, která je rozpustná ve vodě, se při velké vlhkosti povolují vazby v povlaku a povrch tak degraduje. Teplota na organiku působí více než kriticky. Vazby v OSP se uvolní po překročení 150 °C, jinak se uchovávají při běžné pokojové teplotě [8]. Doba skladovatelnosti se nejčastěji udává kolem 6 měsíců, avšak s rostoucí teplotou a vlhkostí se tato doba zkracuje.

2.2 Imerzní cín (Immersion Tin)

Jelikož se cín na měď nanáší iverzně a tloušťka úpravy je velmi tenká, je důležité dodržet čistotu na pracovišti a přesné technologické postupy.

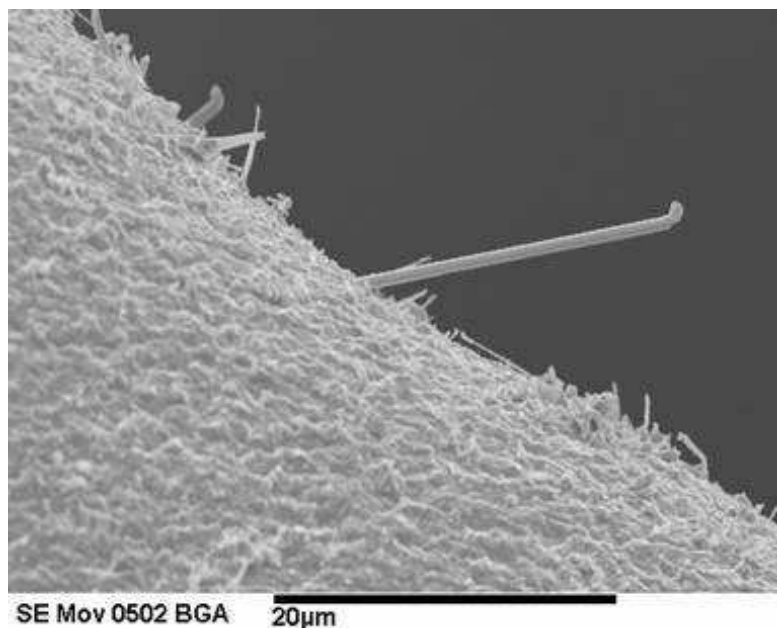
Imerzní cín je stejně jako OSP velmi citlivý na nečistoty okolí, a proto musí být měď před nanesením dokonale očištěna a vyleštěna, jinak by mohlo dojít ke špatnému usednutí cínu na měď.

S mědi pokrytou iverzním cínem se musí zacházet naprosto opatrně. Je potřeba používat ochranné rukavice a přepravník musí být dokonale čistý, aby nedošlo k znečištění povrchu nebo k jeho poškození. Ochrana by už tak nemusela být dostačující, což by mělo za následek horší smáčecí charakteristiky, a tedy defekty při pájení.

Imerzní cín je velmi citlivý na vysoké teploty nebo kyslík při jeho nanášení. Pokud se v ohřívací lázni nechá příliš dlouho nebo při jeho nanášení je přítomen kyslík, vnikne oxid cínu Sn^{4+} , který způsobí špatnou smáčivost povrchové úpravy. [2]

Protože se tloušťka cínu pohybuje v řádech desetin μm , je pro její změření používáno speciálních měřících metod. Tloušťka je však kritická pro správnou přilnavost, a tedy kvalitní pájení, zejména pokud se jedná o vícenásobný průchod přetavovací pecí.

Velmi nebezpečným defektem však je vytvoření tzv. whiskerů. Jedná se o velmi tenká vlákna rostoucí z povrchu cínu a jeho příměsí. Tato vlákna tak mohou způsobit vodivé můstky mezi dvě vývody a způsobit tak zkrat. Průměr whiskerů se pohybuje od 0,006 do 10 μm a délky mohou dosahovat až několik mm. Vlákna mohou růst několik dní a zvětšují tak svou délku [9]. Díky tak malému průměru ve výkonových aplikacích většinou whisker shoří, ale u náročnějších aplikacích, kde se pracuje s malými proudy už mohou způsobit velké škody. Vznik whiskerů ještě není přesně vysvětlen, i když podle některých teorií mohou vnikat kvůli stresům, především tlakovým stresům uvnitř cínu. Jiné teorie mluví o rekrystalizaci a abnormálním růstu cínové struktury. Další možnou teorií je difuze mědi do cínu a „vytlačování“ cínu vzhůru. Jednotná teorie ještě nebyla zcela zjištěna a tvorba whiskerů je tak předmětem výzkumů. [10]



Obr. 2-1: Ukázka cínového whiskeru (převzato z [2])

2.3 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)

I přestože je ENIG považován za nejlepší možnou povrchovou úpravu, je také ze všech nejvíce závislá na dodržení správného pracovního postupu, při jejich nedodržení vykazuje ENIG velké zhoršení svých smáčecích charakteristik. Další problémy, se kterými se může výrobce potýkat, je napadení tekutých fotocitlivých masek (LPISM) zlatem, což může způsobit nadzvednutí nebo změkčení masky v okolí plošek. [2]

Rozhodující je tloušťka vrstvy, jak niklu, který silně ovlivňuje pevnost pájeného spoje, tak i zlata, která se pohybuje v rozmezí 0,05 až 0,2 μm . Pokud je vrstva příliš tenká, povrchová úprava má slabou odolnost vůči teplotám a oxidaci. Pakliže je vrstva příliš tlustá, vzniká tak černá pájecí ploška tzv. black pad.

Black pad vzniká tak, že zlato agresivně napadá nikl, který velmi silně koroduje a zanechává za sebou pouze fosfor, jež bývá do niklu přidáván. Protože je fosfor nepájitelný a zlato se rozpouští do pájky a mědi, vniká tak velmi slabý a křehký pájený spoj. Kolem tohoto spoje vytvoří černé okraje a po ulomení je celá ploška černá od fosforu. Tento defekt má hlavní nevýhodu v tom, že může projít elektrickým testem a na závadu se může přijít až později u zákazníka. Nejvíce se black pad vyskytuje na menších ploškách. [2]

3 PÁJECÍ SLITINY A PÁJITELNOST

Pájecí slitina, nebo zkráceně pájka, je základní součást pájeného spoje. Ten vzniká termodynamickou reakcí mezi pájkou a materiálem povrchu, na který se pájí. Při výběru pájecí slitiny se pozornost věnuje mechanickým a elektrickým vlastnostem, materiálové kompatibilitě s použitými materiály, způsobu pájení, toxicitě (obsah olova v pájce) a ceně pájky. Kvalitní pájený spoj se vyznačuje především malým smáčecím úhlem a difúzí vzniklou intermetalickou sloučeninou, jejíž ideální tloušťka je stále předmětem výzkumu: pokud je příliš tenká, spoj není kvalitní, jeli příliš tlustá, spoj je křehký a nekvalitní. [1]

Pájka musí především zajišťovat mechanickou fixaci součástí, dobré elektrické propojení, odvod ztrátového tepla a ochranu před oxidací.

Dříve se pájecí slitiny skládaly z kombinace cínu a olova. Protože je ale olovo toxické a jeho odpady mají dopad na životní prostředí, je od roku 2006 v zemích EU zákaz používání pájek s obsahem olova, proto se dnes ve většině aplikací až na výjimky používají pájky bezolovnaté.

Bezolovnaté pájky jsou tedy ekologicky nezávadné, ale svými mechanickými a elektrickými vlastnostmi nedosahují kvalit olovnatých pájek, také jsou více křehčí a mají výrazně vyšší teplotu tavení. Na pájení je tak potřeba vyšší energie, aby se dosáhlo roztavení těchto slitin. Vyšší teplota má ovšem negativní dopad nejen na pájené součástky a DPS, ale i na spoj jako takový. Bezolovnaté slitiny mají také horší smáčecí charakteristiky a ve většině případů jsou drahé oproti olovnatým slitinám. Za vyšší cenu mohou většinou drahé kovy, které jsou v pájkách obsaženy, aby se docílilo co nejlepších vlastností. Tyto kovy jsou například stříbro, nikl, měď, bismut, antimon a jiné. Ovšem v pájce je stále ve většině zastoupen cín.

3.1 SAC 305

V současnosti nejpoužívanější bezolovnatá pájecí slitina SAC 305 je z 96,5 % tvořena cínem, 3 % stříbrem a 0,5 % mědí. Stříbro s mědí dodávají pájenému spoji dostatečnou pevnost a tepelnou odolnost. Svými vlastnostmi se nejvíce blíží k olovnaté pájce Sn63Pb37, která je považována za zatím nejlepší pájku. Má dobré mechanické vlastnosti a spolehlivost spoje. Teplota tavení této slitiny je 217 °C, tedy o 34 °C vyšší než zmíněná olovnatá pájka. Pájka má ovšem vyšší povrchové napětí, což způsobuje horší smáčecí charakteristiku, matnější a drsnější povrch. Stříbro obsažené ve slitině také způsobuje vyšší cenu. [1]

3.2 SN100C

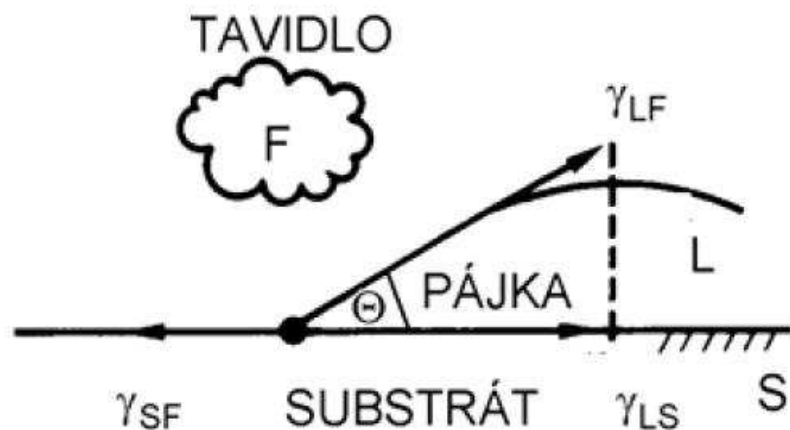
Druhá nejpoužívanější pájecí slitina současnosti. Je tvořena z 99,3 % cínem, 0,7 % mědí a 0,05 % niklem, v některých případech je do slitiny přidáno ještě 0,005 % germania. Svým vzhledem a tekutostí je velice podobná olovnaté pájce Sn – Pb, ale oproti pájce SAC 305 má horší smáčecí charakteristiky, o 10 °C vyšší teplotu tavení (tedy 227 °C) a menší rychlost vzrůstu IMC v tuhé fázi. Na druhou stranu naproti SAC 305 má nejvýraznější vzrůst IMC v tekuté fázi a má výrazně menší erozi mědi. [4]

3.3 SnBi

V dnešní době je v elektrickém průmyslu velký zájem o nízkoteplotní bezolovnatý pájecí proces, aby se dosáhlo co největší úspory energie, zvýšila se výtěžnost při opravě a eliminovaly se defekty způsobené vysokou teplotou jako je např. head-in-pillow effect. Pro tento styl procesu se využívá nejčastěji SnBi pájecí slitina tvořena z 58 % cínem a 42 % bismutem s teplotou tavení 139 °C. Bismutová pájka sice není dostatečně silná a spolehlivá, aby mohla nahradit bezolovnaté pájky jako SAC, nebo eutetickou SnPb pájku. Další nevýhodou této pájky je citlivost na kontaminaci olovem, pokud se ve slitině vyskytne i 1 % olova, teplota tavení může klesnout až na 96 °C. Nízká přetavovací teplota může mít za následek nedostatečné aktivaci tavidla a tím vzniklé odsmáčení pájky z povrchu.

3.4 Pájitelnost

Co je od pájky především očekáváno, je tak zvaná pájitelnost. Jeden z hlavních ukazatelů pájitelnosti je tzv. smáčivost. Jedná se o ukazatel dvou jevů, kdy prvním jevem je uchycení pájecí slitiny na povrchu pomocí povrchového napětí. Další jev je termodynamická reakce, kdy atomy roztavené pájky se propojí s atomy povrchu a vytvoří tak novou slitinu, kterou nazýváme intermetalickou sloučeninou. [11]



Obr. 3-1: Působení sil během tavení

Dalším ukazatelem je roztékavost týkající se schopnosti roztavené pájky volně pomocí gravitační síly a povrchového napětí pokrýt co největší volnou plochu nebo vyplnit otvory. Roztékavost je naproti smáčivosti nejvíce ovlivněna faktory jako je povrchové napětí, kvalita pájky, tavidla, typ povrchu, jeho orientaci aj.

Pájka se po roztavení chová jako kapalina. Na její povrch tak začnou působit povrchová napětí, která se snaží, aby povrch kapaliny měl co nejmenší plochu, čímž dosahuje kulovitého tvaru. Dále na pájku působí adhezivní síly, které ji nutí rozšířit styčnou plochu mezi oběma kovy. Pokud je povrchové napětí menší než adhezivní síly, pájka se po povrchu smáčí. V opačném případě tak dochází ke vzniku kuliček. Pájka se roztéká po povrchu do doby, než jsou povrchové a adhezivní síly v rovnováze. [1]

Všechny proměnné, které ovlivňují smáčivost a roztékavost, mají obrovský vliv na celkovou pájitelnost povrchu. Abychom mohli pájitelnost vyhodnotit, je ji potřeba převést na

číslo, k tomuto účelu nám slouží Youngova rovnice:

$$\gamma_{SF} - \gamma_{SL} = \gamma_{LF} \cdot \cos \theta \quad (3.1)$$

Po úpravě rovnice (3.1) dostaneme:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SF} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LF}} \quad (3.2)$$

Kde γ_{SF} je povrchové napětím mezi substrátem (substrate – S) a tavidlem (flux – F), γ_{SL} znamená povrchové napětí mezi substrátem (S) a rozpuštěnou pájkou (liquid/molten solder – L), γ_{LF} označuje povrchové napětí roztavené pájky (L) a tavidla (F) a nakonec θ vyjadřuje smáčecí úhel.

Aby byla pájitelnost co nejlepší, je třeba, aby smáčecí úhel θ byl co nejmenší. $\cos \theta$ se tak musí pohybovat v intervalu od 0 do 1, protože ke správnému smáčení dochází v případě, že smáčecí úhel θ se pohybuje v intervalu $10^\circ - 90^\circ$. Z rovnice (3.2) tak vyplývá, že γ_{LF} a γ_{SL} musí být co nejmenší, zatímco γ_{SF} by měl být co největší.

Smáčivost dále závisí také na typu pájecí slitiny, jejich mechanických vlastnostech, na tavidle a povrchové úpravě desky a vývodu součástek. Důležitým faktorem jsou také nečistoty, drsnost a míra oxidace na povrchu. Vliv má také pájecí atmosféra a výše teploty, při které se pájecí proces provádí. Výše teploty je ovšem omezená z důvodu tepelné odolnosti součástek, použitého materiálu a samotné desky, ale také dochází k degradaci tavidla a zvýšení míry oxidace během procesu.

3.5 Stárnutí materiálu

Stárnutí materiálu je způsobeno především oxidací povrchu a vznikem příliš tlustých vrstev intermetalických sloučenin na rozhraní dvou materiálů. Avšak bez intermetalické sloučeniny nemůže vzniknout kvalitní spoj, takže správná tloušťka vrstvy intermetalických sloučenin není přesně definována. V závislosti na teplotě a času dochází k nárůstu těchto vrstev, čímž se zhoršuje kvalita spoje. Intermetalické sloučeniny jsou křehčí a méně pevné než její samotné složky. Zároveň se zhoršují elektrické vlastnosti, životnost a smáčivost povrchu.

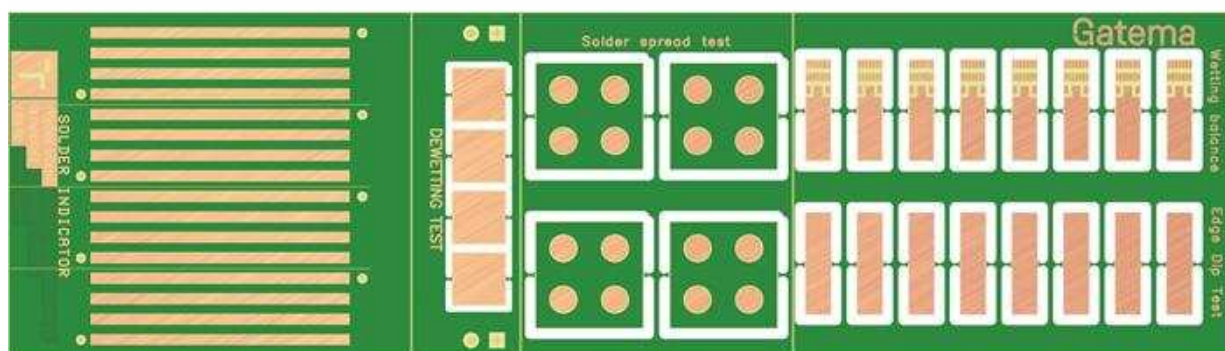
U povrchových úprav DPS se stárnutí projevuje nejvíce u HALu a úprav s imerzním cínem. Na rozhraní mědi a cínu difúzí vznikají intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn a navíc může docházet ke vzniku oxidů na povrchu. U povrchové úpravy ENIG je mezivrstvou niklu zabráněno difúzi mezi zlatem a mědí. [1]

Zrychlené stárnutí materiálu se provádí pomocí tzv. izotermálního stárnutí, kdy je materiál po určitou dobu vystaven zvýšené konstantní teplotě, což má za následek zrychlené tvoření intermetalických sloučenin, zvyšuje se také rychlost oxidace, a tedy i proces stárnutí.

4 METODIKA ZKOUŠEK

4.1 Návrh DPS pro provádění pravidelných zkoušek výrobních testů

Ve spolupráci s firmou Gatema Boskovice byla navržena a zhotovena testovací deska Verze 1, která obsahovala všechny testovací kupony pro provádění pravidelných zkoušek výrobních testů (viz. Obr 4-1). Původní vzhled desky byl inspirován testovací deskou firmy Atotech (viz. Příloha A). Z té se vybrala pouze polovina testů, které byly posléze upraveny do finální podoby. Desky byly poté pokryty povrchovou úpravou ENIG a imerzním cínem.



Obr. 4-1: Navržená testovací deska verze 1 s logem Gatemy a VUT

V rámci této bakalářské práce se největší pozornost věnovala testu solder indicator a wetting balance test metodě. Solder spread test a dewetting test následně sloužily pro porovnání metod.

4.1.1 Solder indicator

Pro tuto metodu byla na desce vytvořena sada 4 testovacích kuponů. Každý kupon obsahoval 4 testovací plošky, na které byla nanášena pájecí pasta SAC 305. Každá sada byla pak podrobena přetavení.

Pájka se roztéká po povrchu působením gravitační síly a povrchového napětí mezi pájkou a substrátem. Velmi podstatný je vliv i tavidla. Roztékavost pájky je důležitým ukazatelem pájitelnosti povrchu, jak lze vyčíst z Youngovy rovnice (3.1), čím menší je smáčecí úhel, tím je lepší smáčivost povrchu. Mechanismy rozpouštění a difúze pájky s pájeným povrchem je vytvořena intermetalická sloučenina, která je nedílnou součástí pájeného spoje.

Smyslem této zkoušky je vyhodnotit schopnost roztékavosti pájecí pasty během přetavování na dané povrchové úpravě a určit rozmezí, v jakém se pohybuje smáčecí úhel. Zkouška se provádí na testovacích ploškách obdélníkového tvaru s rozměry 50 x 2 mm. Na plošku je přes navrženou šablonu s kruhovými otvory o průměru 1 mm nanášena pájecí pasta, která se během přetavení změní na vrchlík pájky. První dva otvory jsou od sebe umístěny 0,1 mm. Poté je každá druhá mezera mezi otvory zvětšena o 0,065 mm, dokud není dosaženo mezery 1 mm. Na délku 50 mm se tak vejde 30 kuliček.

Po přetavení a se kupon nechá vychladnout a následně se očistí od tavidlových zbytků. Pod lupou se vyhodnotí, kolik vrchlíků pájky se steklo dohromady a kolik se jich naopak nespojilo.

Procent spojených vrchlíků tak udává kvalitu smáčivosti povrchu. Další možností vyhodnocení kvality povrchu je změření délky sloupce spojené pájky a uvedení počtu mezer. Jako kritérium pro toto vyhodnocení bylo stanoveno, že jakmile jsou více jak dvě kuličky po sobě nespojené, jedná se o konec sloupce.

Další smáčecí charakteristika, která se při tomto testu vyhodnocuje, je smáčecí úhel, který je vypočítán ze sérií rovnic, kdy je nutné nejprve znát objem a průměr přetaveného vrchlíku:

$$V_{páj} = \frac{\pi v}{6} (3\rho^2 + v^2) [m^3] \quad (4.1)$$

Kde $V_{páj}$ je objem pájky v podobě kulového vrchlíku, ρ je jeho poloměr v m a v představuje výšku v m. Po natisknutí přes šablonu je pájecí pasta ve formě válce, jehož objem je vyjádřen:

$$V = \pi r^2 v [m^3] \quad (4.2)$$

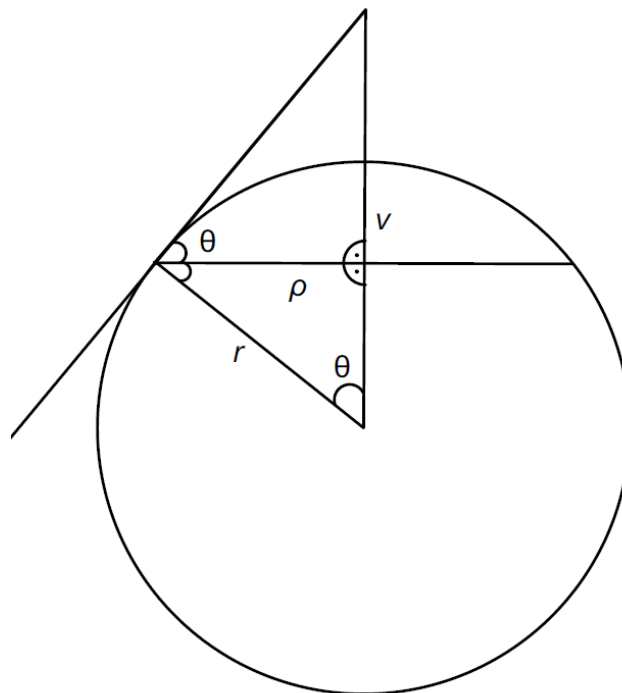
Kde V je objem pájecí pasty, r je poloměr otvoru v m a v je tloušťka šablony v m. Vztah mezi V a $V_{páj}$ je v případě pájecí pasty SAC 305 (s 88 – 89 hmotnostními % kovu): [15]

$$V_{páj} = 0,469 * V [m^3] \quad (4.3)$$

Objem pájky je znám a průměr vrchlíku se změří pomocí optického mikroskopu, lze tak rovnicí (4.1) upravit na výpočet výšky v a vznikne tak kubická rovnice:

$$v^3 + 3\rho^2 v - \frac{6V_{páj}}{\pi} = 0 \quad (4.4)$$

Po vypočtení rovnice (4.4) vždy zůstane pouze jeden kladný reálný výsledek, který udává výšku vrchlíku.



Obr. 4-2: Grafické zobrazení výpočtu smáčecího úhlu

Z Obr. 4-2 je patrné, že průměr vrchlíku z 2 D pohledu představuje tětivu kružnice. Pomocí rovnice pro výpočet délky tětivy se tak zjistí poloměr kružnice [16]:

$$r = \frac{\rho^2 + v^2}{2v} \text{ [m]} \quad (4.5)$$

Kde r představuje poloměr kružnice v m, ρ poloměr tětivy v m a v výšku kruhové výseče v m. Jakmile je znám poloměr kružnice, je následně vypočítán smáčecí úhel θ díky podobnosti trojúhelníku (viz. Obr. 4-2):

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\rho}{r} \text{ [}^\circ\text{]} \quad (4.6)$$

Díky znalosti teoretického výpočtu smáčecího úhlu θ je možno předpokládat, že aby došlo ke spojení kuliček, musí poloměry obou vrchlíků pájky dosahovat nejméně do poloviny vzdálenost, které mezi sebou středy vrchlíků mají. Sérií rovnic 4.1 až 4.6 je tak možné stanovit spodní hranici smáčecího úhlu, jakého lze dosáhnout, aby stále došlo ke spojení vrchlíků pájky (viz. Tabulka 4-1). Smáčecí úhel je poté vyhodnocen ze dvou spojených vrchlíků, které měly mezi sebou největší vzdálenost středů.

Tabulka 4-1: Nejmenší smáčecí úhel pro vzdálenosti mezi aperturami a středy apertur (otvorů) v šabloně

Vzdálenosti středů [mm]	Vzdálenosti [mm]	Smáčecí úhel [°]
1,1	0,100	27,91
1,165	0,165	23,76
1,23	0,230	20,37
1,295	0,295	17,58
1,36	0,360	15,20
1,425	0,425	13,27
1,49	0,490	11,64
1,555	0,555	10,27
1,62	0,620	9,10
1,685	0,685	8,10
1,75	0,750	7,24
1,815	0,815	6,50
1,88	0,880	5,86
1,945	0,945	5,25
2	1,000	4,83

Výše uvedená vyhodnocení mají platnost pouze v případě, že je povrch smáčivý nebo se smáčecí úhel pohybuje v intervalu uvedeném v Tabulce 4-1. V případě nesmáčivého povrchu, kdy vrchlíky pájky jsou shlukovány do tvaru kuliček, je počet spojených vrchlíků i délka sloupce pájky rovna nule. Kuličky pájky se mohou po nesmáčivém povrchu pohybovat, a tak jejich případné spojení není vyhodnocováno. Smáčecí úhel, který je vyšší a pohybuje se tak mimo Tabulku 4-1, je vypočten ze samostatného vrchlíku pájky, jehož průměr je změřen pod mikroskopem. V případě vzniku kuliček je smáčecí úhel větší než 90 °. U obou dvou případů se jedná o nežádoucí stav.

4.1.2 Solder spread test

Cílem této zkoušky je určit smáčecí úhel povrchu pájecích plošek, stanovit vzhled roztečené pájky a eventuálně provést mikrovýbrusy testovacího kuponu. Testovací deska je navržena se čtyřmi testovacími kupony. Každý kupon obsahuje čtyři kruhové testovací pájecí plošky. Na tyto plošky se přes šablonu skrze kruhové otvory s průměry 1,5 a 2,5 mm nanese pájecí pasta o definovaném objemu. Po šablonovém tisku je pasta přetavena.

Jakmile dojde k přetavení pasty, je vzorek očištěn, označen a vložen pod optický mikroskop Olympus SZ61. Zde se změří poloměr vrchlíku pájky. Po sérii rovnic 4.1 až 4.6. je následně vyhodnocen smáčecí úhel roztavené pájky, vzhled pájky a případně je na testovacím kuponu proveden mikrovýbrus.

4.1.3 Dewetting test

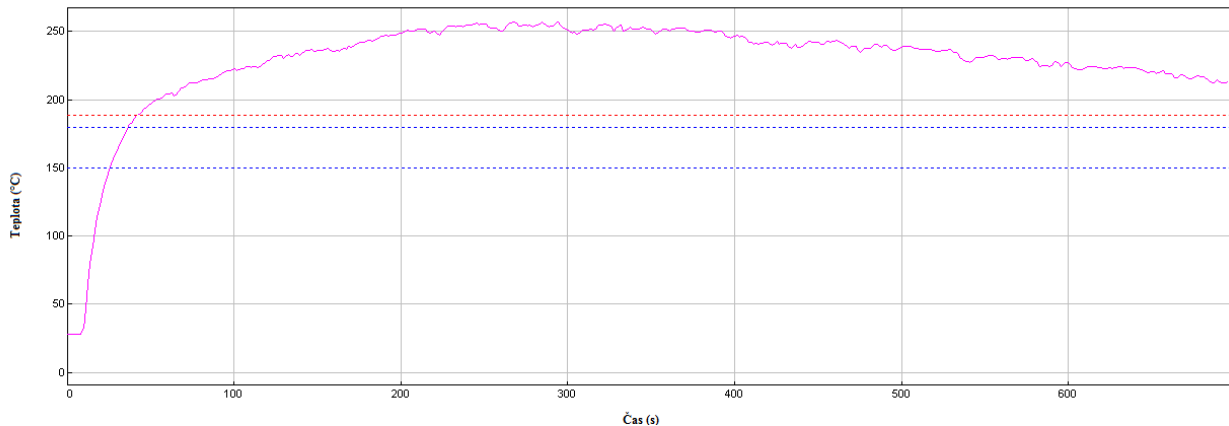
Kromě smáčivosti, kdy během pájení dochází k roztečení pájky po povrchu, k vytvoření intermetalické sloučeniny a vytvoření tak pájeného spoje, nás také zajímá odsmáčení pájky. K tomu dochází v případě, kdy dojde k roztečení pájky po povrchu a následně díky reakčním mechanismům mezi pájkou a povrchovou úpravou dojde ke shlukování pájky a zmenšení povrchu roztečené pájky, přičemž na povrchu zůstává šedá vrstva, jako výsledek původní reakce. Jakákoliv tekutá látka se vždy snaží dosáhnout stavu s nejmenší energií, tedy do tvaru s co nejmenší plochou. Ze všech těles má nejmenší plochu právě koule, proto se při odsmáčení začne pájka stahovat do kulatého tvaru.

Tato zkouška má za úkol zhodnotit chování pájecí slitiny při několikanásobném průchodu přetavovací pecí. Pájka v pájeném spoji již neleží na povrchové úpravě, ale na intermetalické sloučenině vytvořené spojením pájecí slitiny a povrchu. Jakmile dojde k dalšímu přetavování, kdy opět uvedeme pájku do tekutého stavu, bude se vrstva intermetalické sloučeniny zvětšovat a roztavená pájka by tak měla mít po každém přetavení větší smáčecí úhel z důvodu horších smáčecích charakteristik povrchu.

Testovací kupony jsou ve formě oboustranně plátovaných čtverců 10 x 10 mm, které jsou celé pokryté mědí s povrchovou úpravou. Skrze otvory v šabloně s průměrem 3 mm je na vzorky nanесena pájecí pasta SAC 305. Ta je poté přetavena. Po každém průchodu bude na optickém mikroskopu změřen průměr vrchlíku pájky a vypočten smáčecí úhel.

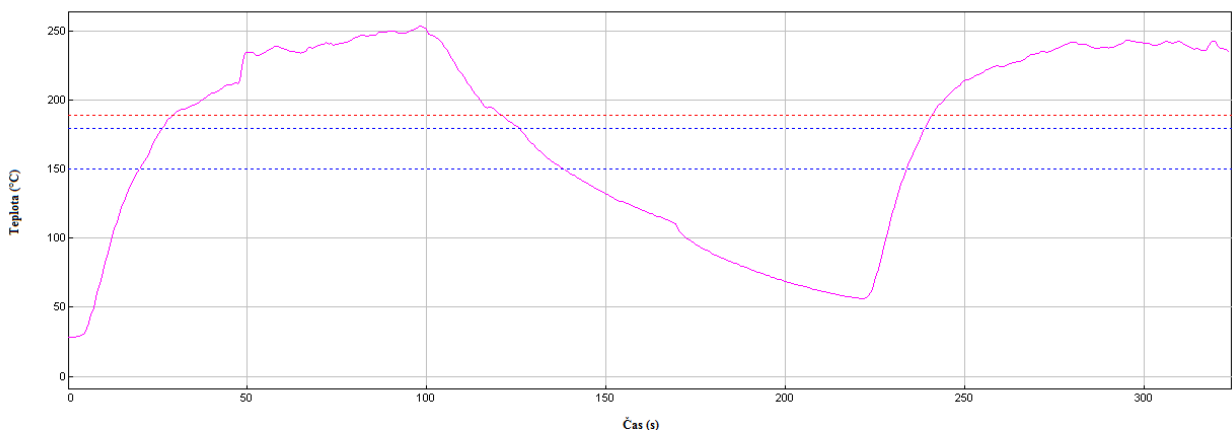
4.1.4 Metody pájení přetavením

Jako první způsob přetavení se zvolila metoda, která spočívá v položení DPS na roztavenou pájku o teplotě 260 °C (označováno zkráceně jako kondukce). Tato metoda využívá kondukce tepla k vyhřátí celého testovacího kuponu a tím tak rovnoměrně přetaví pájecí pastu. Protože jsou všechny vzorky oboustranně plátované, tak strana, která bude plavat na roztavené pájce je nejprve pokryta kaptonovou páskou, aby nedošlo ke kontaminaci lázně a k znehodnocení plošek. Po přetavení je plovoucí povrch tepelně namožen a vrstva intermetalické sloučeniny mezi mědí a povrchovou úpravou tak vzroste, což může být po očištění použito pro měření smáčecího úhlu tepelně namoženého povrchu.



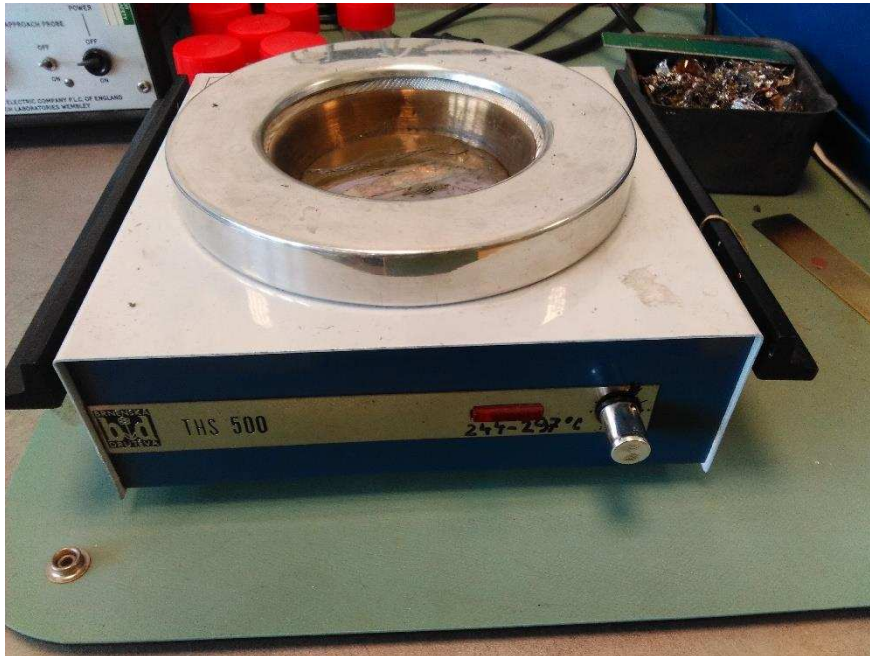
Obr. 4-3: Naměřený teplotní profil kuponu na roztavené pájce SAC 305

Pájka je umístěna v nerezové misce, která je následně upevněna v topném hnízdě THS 500. Hnízdo však vyhřívá lázeň v intervalu od 244 – 297 °C. Bylo proto nutné zajistit, aby byly pro testované kupony co nejvíce stejné podmínky. Naměřené hodnoty z Obr. 4-3 ukazují, že deska se vyhřeje maximálně na 257 °C a dále je chlazena vzduchem. Na Obr. 4-4 je změřen teplotní profil dvou po sobě jdoucích desek, kdy rozdíl mezi vložení první a druhé desky jsou dvě minuty. Teplotní gradient u první desky je roven 2,3 °C/s a u druhé desky 2 °C/s. Lze tak říci, že desky, které jdou po sobě budou mít téměř stejný teplotní profil.



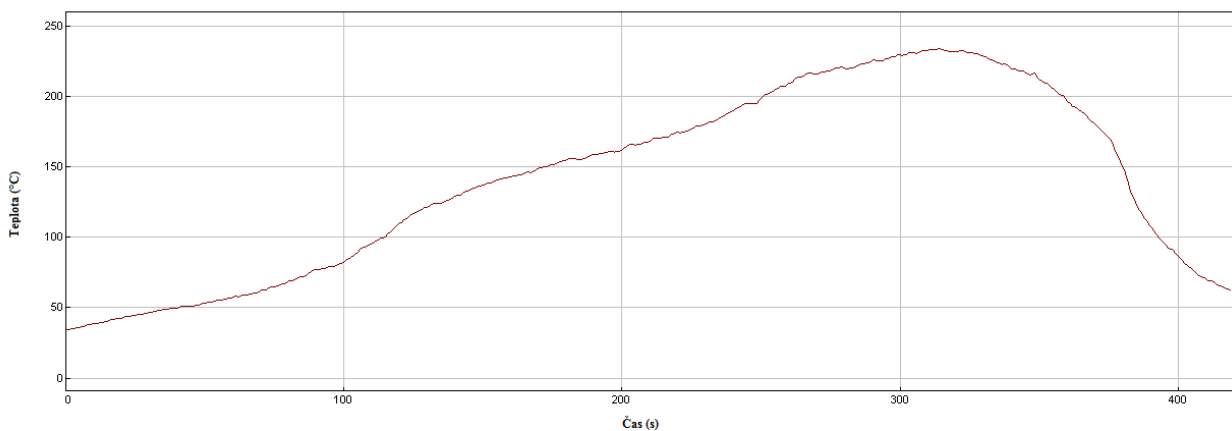
Obr. 4-4: Naměřený teplotní profil dvou po sobě jdoucích desek

Z experimentálního měření se zjistilo, že teplota pájecí lázně dosáhne hodnoty 260 °C dvě minuty po sepnutí hnízda. Hnízdo pak nadále vyhřívá lázeň další minutu, než se vypne a setrvačností vyhřeje lázeň do 297 °C během dvou minut. Poté se pájka začne vlivem okolního vzduchu postupně ochlazovat do počáteční teploty 244 °C, než se znovu sepne. Z praxe se tak uvedlo, že kupon bude na roztavené pájce plavat 90 s, než se z pájecí lázně vyjme. Hned poté se do lázně umístí druhý testovací kupon se stejnými podmínkami.



Obr. 4-5: Topné hnízdo THS 500 s pájkou SAC 305

Pro porovnání s kondukcí se bude také pájet skrze přetavovací pec DIMA SMRO 180 (označováno zkráceně jako reflow). Tato metoda bude však pouze orientační, protože pec obsahuje pouze tři zóny a není určena pro bezolovnaté pájení. Z teplotního profilu pece (Obr. 4-6) bylo vyčteno, že nejvyšší teploty se dá dosáhnout pouze 234 °C. Pro reflow pájení SAC 305 je potřeba dosáhnout v přetavovací zóně teplot od 230 – 250 °C [14]. Pájecí pasta se tak přetaví na své nejnižší hranici, a tím pádem se nedá počítat s příliš přesnými výsledky.

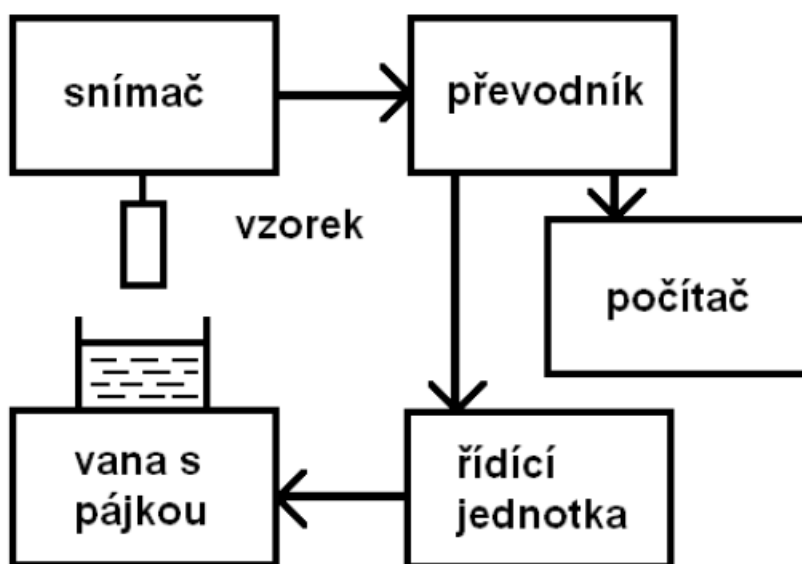


Obr. 4-6: Naměřený teplotní profil přetavovací pece DIMA SMRO 180

4.2 Metoda smáčecích vah (Wetting balance test method)

Tato metoda nám zajišťuje velmi přesné výsledky, je proto vhodná pro měření smáčení součástek. Nejvíce se používá pro měření charakteristiky pájitelnosti plátovaných základních materiálů s povrchovou úpravou. Test je definován v ČSN EN 60068 – 2 – 69 a ČSN EN 34 5791 – 2 – 54. [12]

Vzorek, který může být kontakt součástky, část DPS, případně jiná testovaná součástka, je pokryt tavidlem a zavěšen na velmi přesné mikrováhy nad nádobou s roztavenou pájkou. Vzorek by měl s lázní svírat úhel 90° . Samotné měřicí zařízení se nazývá „meniskograf“. Zatímco je vzorek pověšen na mikrováhách a zůstává na jednom místě, nádoba s roztavenou pájkou leží na zdvihačím mechanismu ovládaném krokovým motorem. Pomocí termočláunku vloženém přímo do pájky je teplota pájky regulována s přesností $\pm 1^\circ\text{C}$. Blokové zapojení meniskografu je znázorněno na Obr. 4-7.



Obr. 4-7: Blokové zapojení meniskografu (převzato z [1])

Na Obr. 4-8 je zobrazena obecná křivka smáčení. Před ponořením na vzorek nepůsobí žádná smáčecí síla, ta je zobrazena do bodu T_1 , kde již dojde ke kontaktu s roztavenou pájkou. Aby mohl přístroj začít měřit působící síly je potřeba, aby došlo k vodivému spojení mezi pájkou a mikrováhami, jinak nebude měření probíhat. Až do bodu T_2 působí na vzorek Archimédův zákon vztahové síly a povrchové napětí. Při ponoru se pájka nesmáčí, tedy smáčecí úhel je větší jak 90° , a proto vztahová síla i povrchové napětí mají stejnou orientaci a vytlačují tak vzorek z pájecí lázně. Sklon křivky mezi bodem T_1 a T_2 je dán rychlostí noření, který může nastavením kroků regulovat. Smáčení začíná v bodě T_3 , kdy se smáčecí úhel postupně zmenšuje a smáčecí síla mění svou hodnotu, čímž se mění působení sil. Časový interval mezi T_2 a T_3 je dán tepelnou kapacitou vzorku a přestupem tepla mezi pájkou a vzorkem. Pájka se na vzorek postupně navztlíná, jak se mění smáčecí úhel, a vzorek je více vtahován do pájky. Bod T_4 je část, kdy je hladina pájky kolmá ke vzorku a obě působící síly jsou v rovnováze, tato část je také nazývána jako korigovaná nula. Jak se pájka více navztlínává a zmenšuje se smáčecí úhel, roste smáčecí síla a vzorek je vtahován do pájky. Tvar mezi T_3 a T_5 je dán rychlostí smáčení a určuje tak kvalitu smáčivosti. Bod T_6 zobrazuje největší smáčecí sílu a T_8 je vrchol křivky a určuje, kdy došlo k úplnému vytažení vzorku z lázně. Síla v bodě

T_8 je největší, protože na vzorek působí jak povrchové napětí vzorku, tak i povrchové napětí hladiny pájky. Bod T_9 je konečný stav.

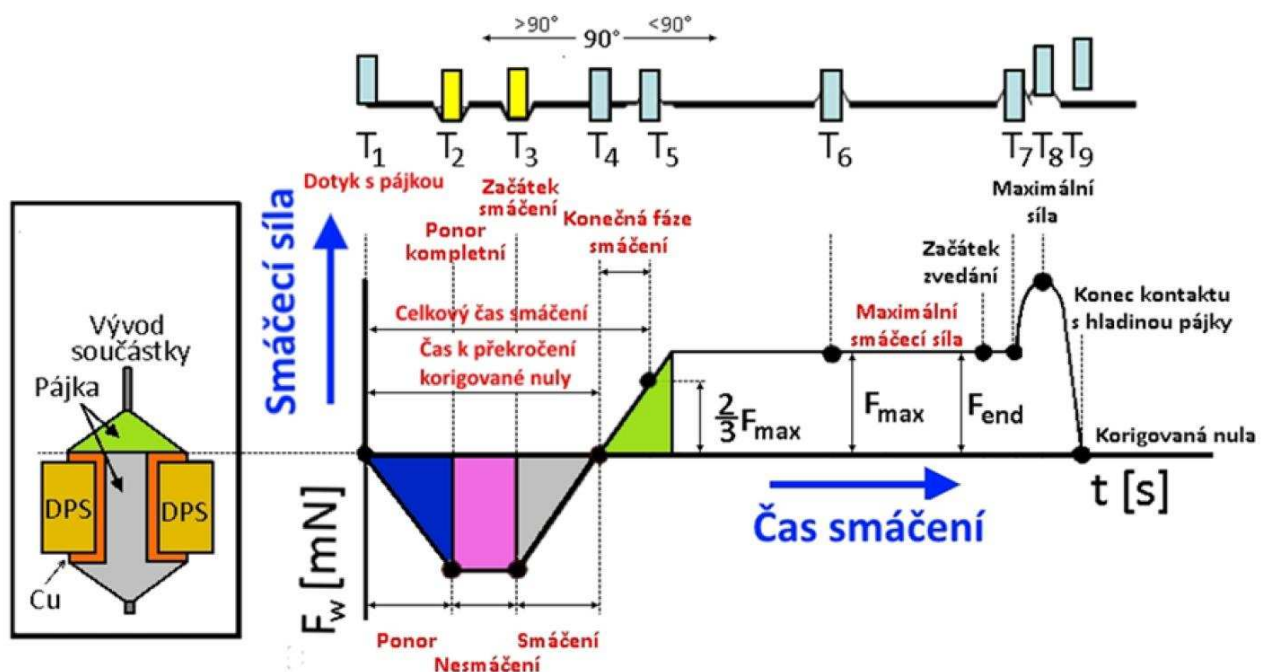
Důležitým bodem smáčení je bod T_4 , kdy dochází k vyrovnání vztlakové síly a povrchového napětí. Výsledná síla je označena jako F [N] a je vyjádřena rovnicí (4.7):

$$F = F_W - F_{vz} \text{ [N]} \quad (4.7)$$

$$F_W = \gamma \cdot p \cdot \cos\theta \text{ [N]} \quad (4.8)$$

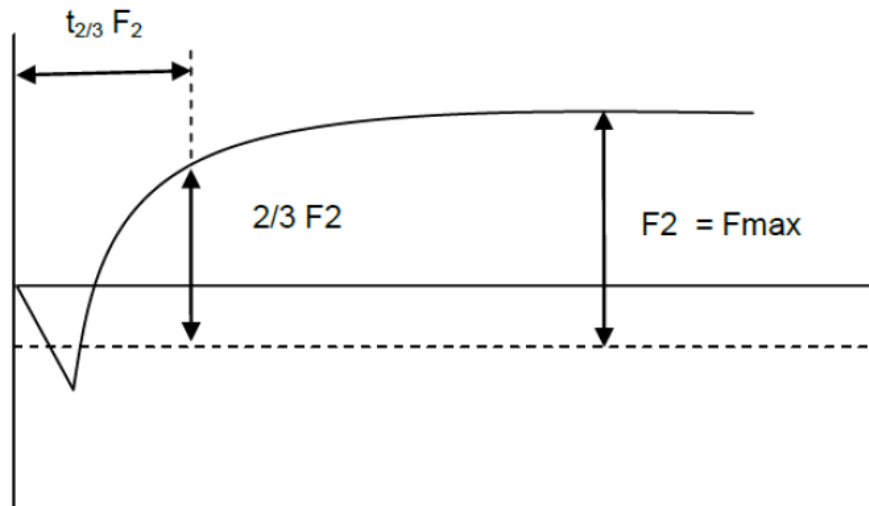
$$F_{vz} = \rho \cdot g \cdot V \text{ [N]} \quad (4.9)$$

Kde F_W je smáčecí síla, γ je povrchové napětí roztavené pájky pod tavidlem v $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$, p obvod vzorku v m, g gravitační zrychlení $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, V objem ponořené část vzorku v m^3 , θ je kontaktní úhel ve $^\circ$, ρ je hustota pájky v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a F_{vz} představuje Archimedovu vztlakovou sílu.



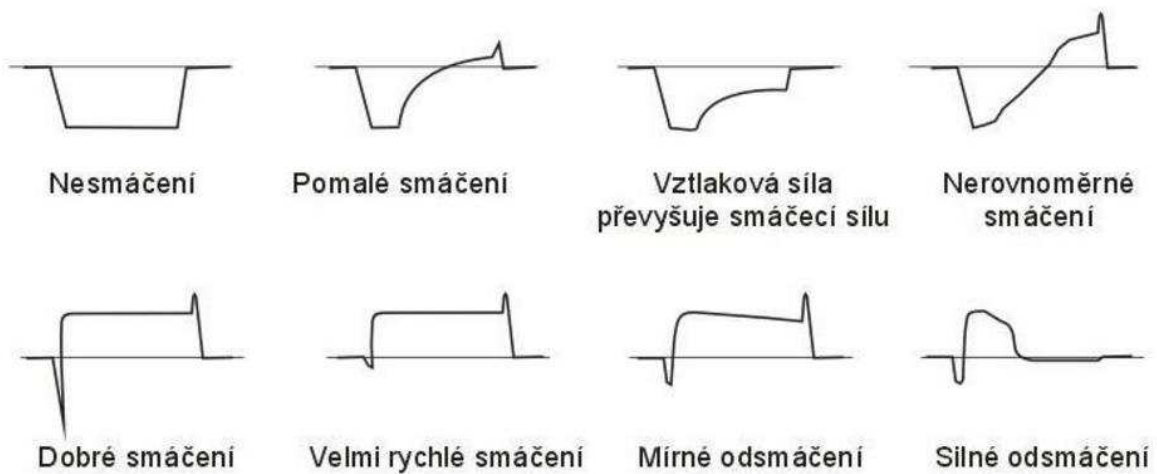
Obr. 4-8: Křivka smáčecí síly (převzato z [1]).

Pokud je od hodnoty nula na y-ose odečtena hodnota F_{vz} z rovnice 4.9, je získána tak výše zmíněná korigovaná nula (znázorněna přerušovanou čarou na Obr. 4-9). Tato korigovaná nula bude procházet pod nulovou osou přístroje. Všechny síly a časy se pak následně odčítají od této korigované nuly. Především nás zajímá maximální síla F_2 vypočítaná z F_{max} a korigované nuly. Z ní se pak vypočítá síla $F_{2/3}$ odpovídající $2/3$ síly F_2 . Čas, kdy dosáhneme síly $F_{2/3}$, je označován jako $t_{2/3}$. Poměr $F_{2/3}$ a $t_{2/3}$ nám pak udává smáčivost materiálu.



Obr. 4-9: Síla $F_{2/3}$ v čase $t_{2/3}$ (převzato z [1])

Tímto měření lze velmi přesně změřit smáčivost a rovněž vliv dalších činitelů, které smáčení ovlivňují. Tyto činitele ovlivňují výsledný tvar křivky, na Obr. 4-10 jsou zobrazeny charakteristiky při pro různé ovlivňující činitele.



Obr. 4-10: Příklady průběhů časové závislosti smáčecí síly (převzato z [12]).

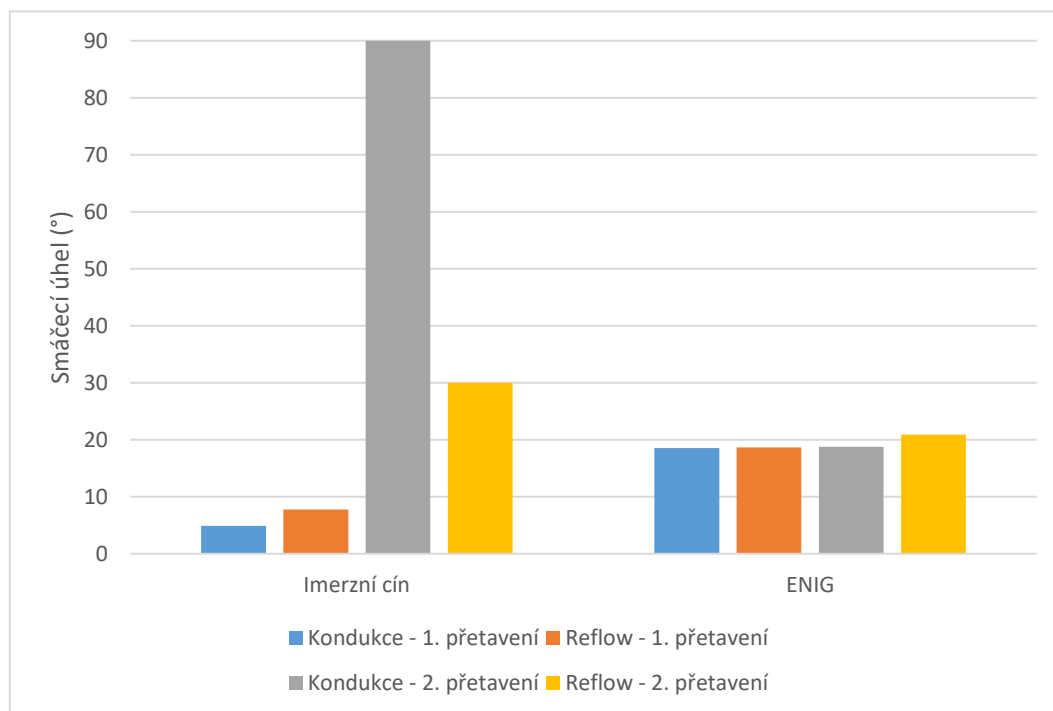
5 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY A DISKUZE

5.1 Solder indicator

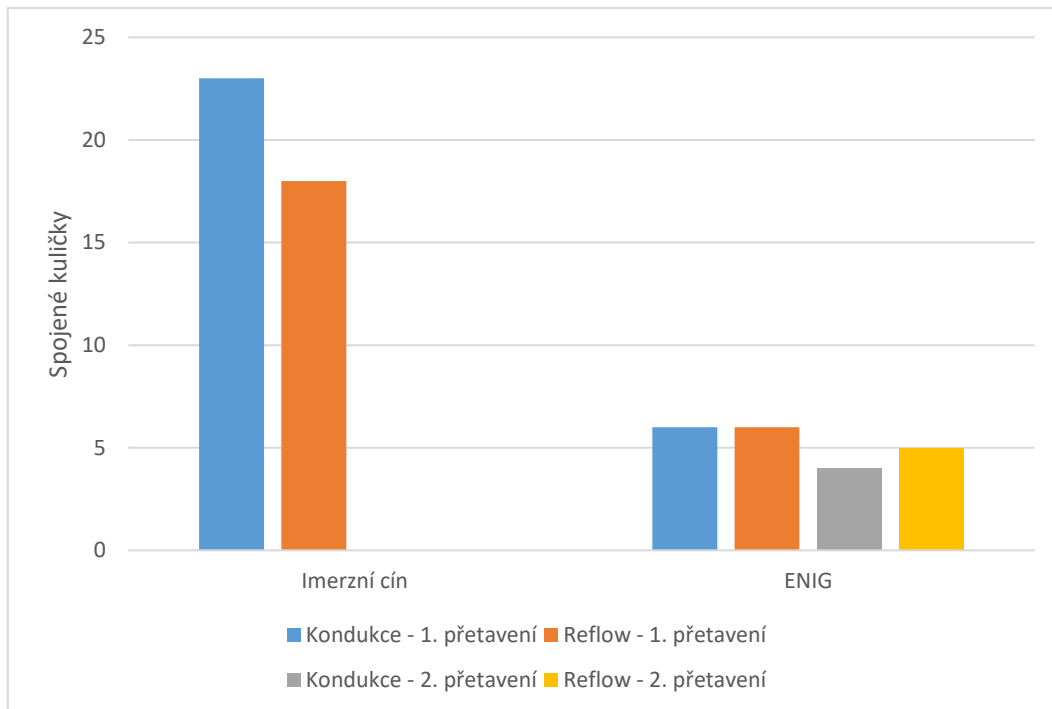
Pro tuto metodu byla vytvořena sada testovacích kuponů. Ta obsahovala 8 kuponů s povrchovou úpravou ENIG a 8 kuponů s imerzním cínem. Každý kupon obsahoval 4 testovací plošky 50 x 2 mm. Dohromady tedy každá sada obsahovala 32 testovacích plošek s úpravou ENIG a 32 plošek s imerzním cínem. Tento počet testovacích plošek měl zajistit co nejpřesnější výsledky z hlediska statistiky. Na každý kupon byla nanášena pájecí pasta SAC 305. Každá sada byla pak podrobena přetavování. První sada se přetavila pomocí kondukce na roztavené pájce SAC 305 o teplotě 260 °C po dobu 90 s. Další sada byla poslána skrze přetavovací pec s definovaným pájecím profilem (viz. Obr. 4-6).

Protože kupony byly oboustranně plátované, rozhodlo se otestovat druhou stranu kuponů po průchodu jak reflow přetavením, tak i přetavením pomocí kondukce. Z toho důvodu při plavání kuponu na roztavené pájce byla druhá strana pokryta kaptonovou páskou, aby nedošlo k pokrytí plošek pájkou a také, aby nedošlo ke kontaminaci pájecí lázně. Po prvním průchodu byla první strana vyhodnocena a následně očištěna od pájky pomocí odsávačky. Druhá strana se očistila izopropylalkoholem a testování se opakovalo.

Změřené a vypočtené hodnoty jak pro vyhodnocení počtu spojených vrchlíků, tak i vyhodnocení délky sloupce spojené pájky pro 1. i 2. přetavení je uvedeno v Tabulce 5-1 až 5-8 (viz. příloha B).

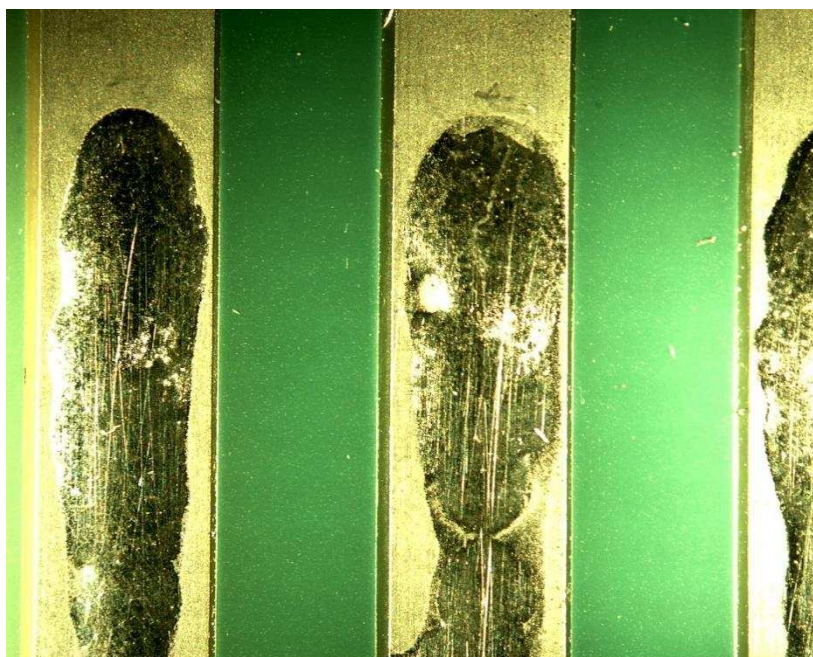


Obr. 5-1: Graf smáčecích úhlu – solder indicator

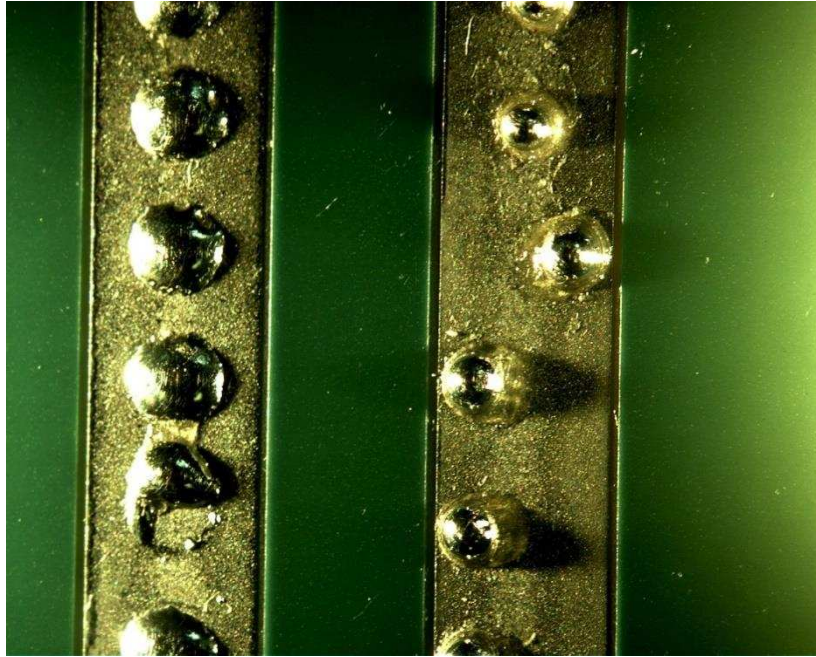


Obr. 5-2: Graf spojení kuliček – solder indicator

Z grafů na Obr. 5-1 a 5-2 je patrné, že nejmenší smáčecí úhel, a tedy i největší spojení kuliček bylo dosaženo během 1. přetavení pomocí konduktce u povrchové úpravy imerzní cín. Nižší počet spojených kuliček u imerzního cínu bylo dosaženo pomocí reflow přetavením, patrně vlivem nižší přetavovací teploty. U přetavení kondukcí se také objevily anomálie, kdy při nižším i vyšším počtu spojených vrchlíků byl výsledný smáčecí úhel stejný. To mohlo být způsobeno špatně provedeným šablonovým tiskem a nedokonalé čistým povrchem, protože metoda vyhodnocuje smáčecí úhel pouze ze spojení dvou nevdálenějších vrchlíků.

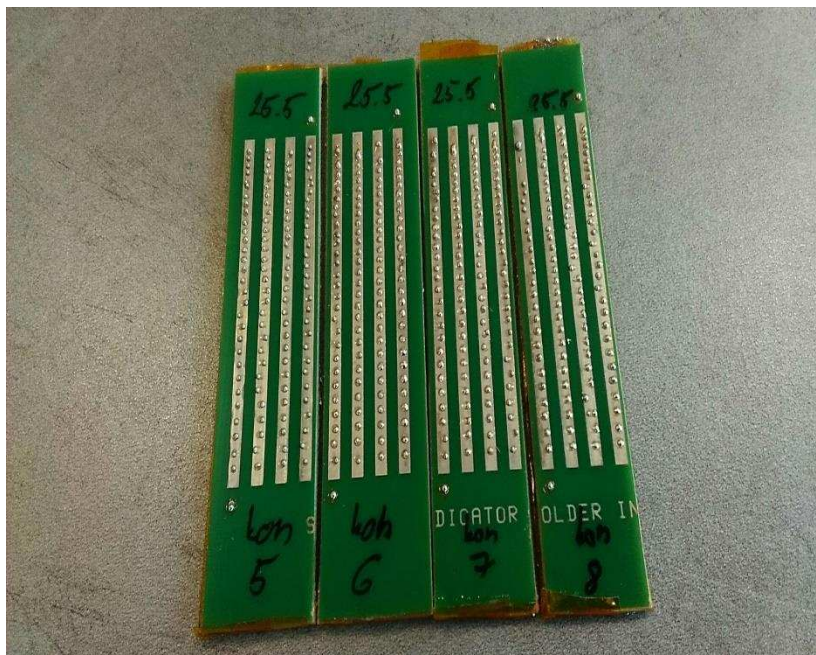


Obr. 5-3: Solder indicator – imerzní cín po 1. přetavení



Obr. 5-4: Solder indicator – imerzní cín po 2. přetavení

Velké zhoršení charakteristik však nastalo po 2. přetavení, kdy se povrch úpravy stal velmi špatně smáčivým. V případě reflow někdy došlo k roztečení pájky (nejlepší úhel uvedený v grafu) a někdy k vytvoření kuliček. V případě kondukcí se povrch stal vlivem vyšší teploty, a tedy větší tloušťkou sloučeniny cín-měď nesmáčivým. Smáčecí úhel tak byl označen jako 90 °. Obr. 5-3 a 5-4 slouží pro porovnání smáčení pájky po 1. a 2. přetavení imerzního cínu. Zatímco po 1. přetavení se pájka rozteče a spojí do jednoho sloupce pájky, po 2. přetavení se vlivem nesmáčivého povrchu pájka shlukovala do tvaru kuliček. Na Obr. 5-4 je také vidět, že kuličky pájky se na nesmáčivém povrchu rozmístily náhodně. Z toho důvodu je také případné spojení po 2. přetavení způsobeno pohybem kuliček po povrchu, a ne vlivem roztékání pájky.



Obr. 5-5: Ukázka nesmáčivosti po 2. přetavení kondukcí u imerzního cínu

Smáčecí úhel uvedený v Tabulce 5-5 byl tak potřeba změřit individuálně, jelikož výpočetní metoda pro smáčecí úhly v kapitole 4 pomocí mezer zde nemohla být použita. Smáčecí charakteristiky imerzního cínu po 2. přetavení jsou tak brány jako nevyhovující. Na Obr. 5-5 je ukázka nesmáčivosti povrchu imerzního cínu.

U povrchové úpravy ENIG byly výsledky více stabilní, než tomu bylo u povrchové úpravy imerzní cínu. Rozdíl ve spojení kuliček mezi reflow pájení a přetavení pomocí kondukcí byl téměř nepatrný, i když v případě kondukcí byly smáčecí charakteristiky lepší. Po 2. přetavení byly výsledky mnohonásobně lepší, než tomu bylo u imerzního cínu, i když horší smáčecí charakteristiky byly opět zaznamenány u pájení kondukcí. Důvod byl stejný, vyšší teplota způsobila větší difuzi a vznik tlustší vrstvy intermetalické sloučeniny, která se projevuje horšími smáčecími charakteristikami.

5.2 Wetting balance test metoda

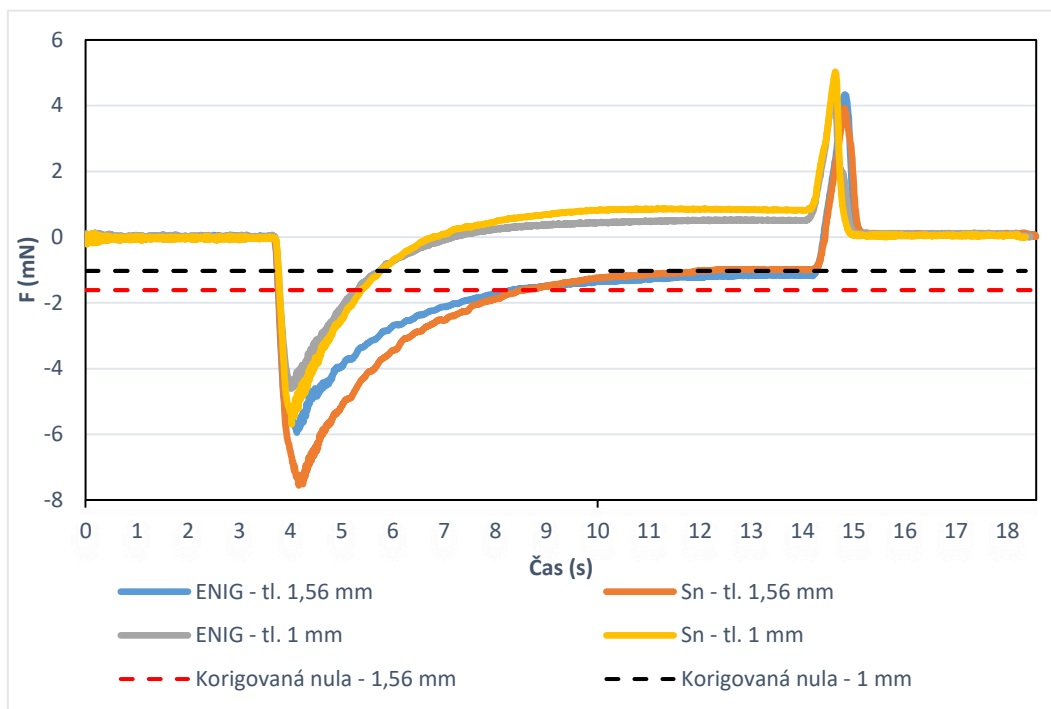
Pro toto měření byly použity dva typy vzorků: jeden s rozměry 20 x 5 x 1,56 mm a druhý 20 x 5 x 1 mm. Důvod rozdílné tloušťky vzorků bylo otestování vlivu nesmáčivosti neplátovaných bočních stran FR-4. Pro každou tloušťku bylo změřeno 16 vzorků s povrchovou úpravou ENIG a 16 vzorků s imerzním cínem. Vzorky byly prvně ponořeny do tavidla Decoflux AB – 103 – 30 – 0. Následně byl odstraněn přebytek tavidla a testované vzorky se poté vložily do meniskografu MULTICORE Must I, kde byl vzorek ponořen do roztavené pájky SAC 305.

Meniskograf byl nastaven na tyto parametry:

- Teplota pájky: 250 °C
- Ponor: 3 mm
- Prodleva v lázni: 10 s
- Rychlost ponoru: 10 mm/s



Obr. 5-6: Měřicí stanice s meniskografem



Obr. 5-7: Smáčecí charakteristiky obou typů vzorků

Po změření všech hodnot se vypočítal průměr a vytvořil se konečný graf smáčecí charakteristiky

Tabulka 5-9: Naměřené a vypočtené hodnoty pro oba druhy vzorku

	Tloušťka vzorku			
	1,56 mm		1 mm	
	Im. Sn	ENIG	Im. Sn	ENIG
F_{vz} [mN]	1,611	1,611	1,033	1,033
F_{max} [mN]	-0,996	-1,169	0,844	0,506
F_2 [mN]	0,615	0,443	1,877	1,539
$F_{2/3}$ [mN]	0,410	0,295	1,252	1,026
$t_{2/3}$ [s]	6,630	6,760	3,450	3,440
$F_{2/3}/t_{2/3}$ [mN/s]	0,062	0,044	0,363	0,298

Příklad výpočtu pro první sloupec:

$$F_{vz} = \rho \cdot V \cdot g = 7020 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 1,56 \cdot 9,81 \cdot 10^{-9} = 1,611 \cdot 10^{-3} \text{ N} = 1,611 \text{ mN}$$

$$F_{max} = -0,996 \text{ mN (odečteno z grafu)}$$

$$F_2 = F_{vz} + F_{max} = 1,611 - 0,996 = 0,615 \text{ mN}$$

$$F_{2/3} = \frac{2}{3} F_2 = \frac{2}{3} \cdot 0,615 \text{ mN} = 0,410 \text{ mN}$$

$$t_{2/3} = 6,63 \text{ s (odečteno z grafu)}$$

$$F_{2/3}/t_{2/3} = \frac{0,410}{6,63} = 0,062 \text{ mN/s}$$

Kde F_{vz} je Archimedova vztlaková síla v N, F_{max} je maximální smáčecí síla odečtena z grafu v N, F_2 je maximální smáčecí síla od korigované nuly, $F_{2/3}$ představuje hodnotu 2/3 F_2 a $t_{2/3}$ je čas, kdy je této síly dosaženo v s.

Z grafu na Obr. 5-7 lze vyčíst, že rozdíl maximální smáčecí síly u vzorku tloušťky 1,56 mm a 1 mm je více jak 1,5 mN, zatímco rozdíl Archimedovy vztlakové síly je 0,578 mN. Velký vliv na výslednou smáčecí sílu má plátovaná měď a neplátovaná nesmáčivá plocha, která působí proti smáčecí síle. Pro vyhodnocení vlivu nesmáčivého povrchu se vytvořila rovnice:

$$F_{nes}/S_{nes} = \left| \frac{F_{2-1} - F_{2-1,56}}{S_{nes-1} - S_{nes-1,56}} \right| [N/m^2] \quad (5.1)$$

Kde F_{nes} udává rozdíl sil F_2 mezi oběma typy vzorků v N a S_{nes} označuje rozdíl nesmáčivé plochy v m^2 .

Po dosazení získáme vliv nesmáčivé plochy pro ENIG:

$$F_{nes} = F_{2-1} - F_{2-1,56} = 1,539 - 0,443 = 1,096 \text{ mN}$$

$$S_{nes} = S_{nes-1} - S_{nes-1,56} = (5 \cdot 1 + 6 \cdot 1) - (5 \cdot 1,56 + 6 \cdot 1,56) = 11 - 17,16 \\ = -6,16 \text{ mm}^2$$

$$F_{nes}/S_{nes} = \left| \frac{F_{2-1} - F_{2-1,56}}{S_{nes-1} - S_{nes-1,56}} \right| = \left| \frac{1,096}{-6,16} \right| = 0,1779 \text{ mN/mm}^2$$

A pro imerzní cín:

$$F_{nes} = F_{2-1} - F_{2-1,56} = 1,877 - 0,615 = 1,262 \text{ mN}$$

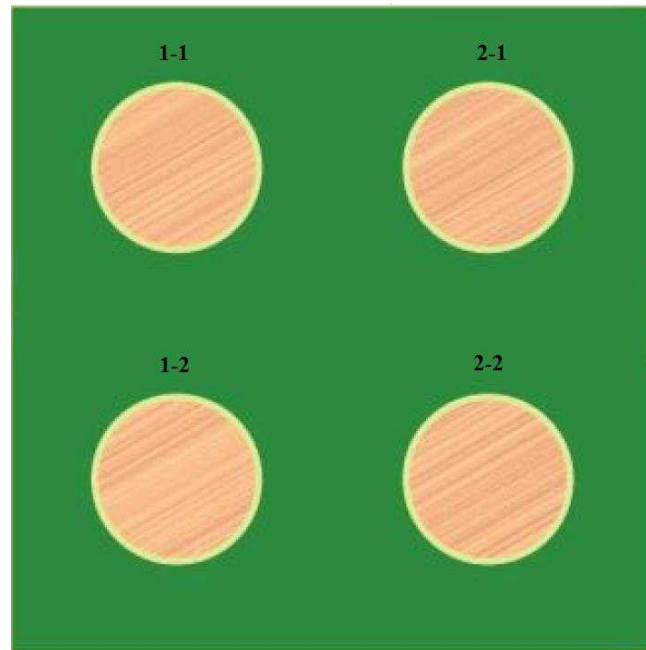
$$S_{nes} = S_{nes-1} - S_{nes-1,56} = (5 \cdot 1 + 6 \cdot 1) - (5 \cdot 1,56 + 6 \cdot 1,56) = 11 - 17,16 \\ = -6,16 \text{ mm}^2$$

$$F_{nes}/S_{nes} = \left| \frac{F_{2-1} - F_{2-1,56}}{S_{nes-1} - S_{nes-1,56}} \right| = \left| \frac{1,262}{-6,16} \right| = 0,2049 \text{ mN/mm}^2$$

Průměrně tak pro obě úpravy vychází vliv nesmáčivé plochy 0,1914 mN/mm². Objem ponořené části tělesa má vliv na rychlost smáčení vzorku, jak je vidět na Obr. 5-7.

5.3 Solder spread test

Na čtvercový kupon obsahující 4 kruhové plošky o průměru 5 mm byla přes šablonu nanесena pájecí pasta SAC 305. Pro zjištění, zdali na smáčecí úhel má vliv množství pasty, byla na dvě plošky nanесena pájecí pasta ve tvaru válce s průměrem 1,5 mm a na zbylé dvě s průměrem 2,5 mm. Pasta byla následně přetavena v přetavovací peci a na roztavené pájce. Pro přehlednost umístění pájky na ploškách byl kupon maticově rozdělen tak, že v prvním sloupci (1-1 a 1-2) byla natisknuta pasta s průměrem 2,5 mm a v druhém sloupci (2-1 a 2-2) pasta o průměru 1,5 mm.

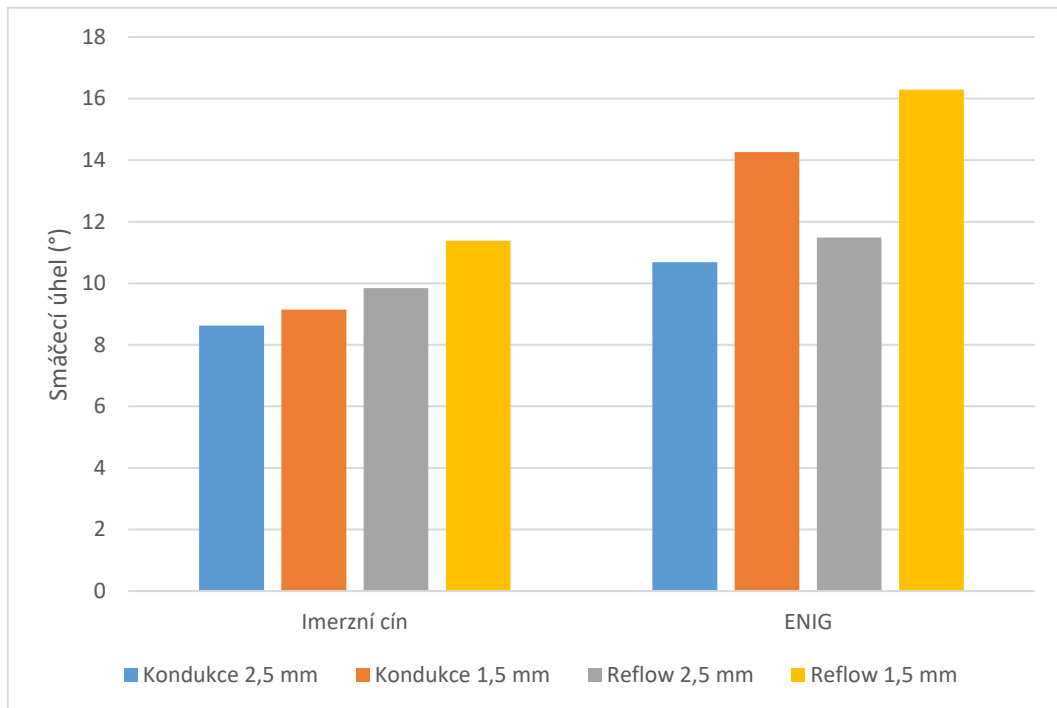


Obr. 5-8: Maticové rozdělení plošek na kuponu

Tabulka 5-10: Naměřené a vypočtené hodnoty solder spread test

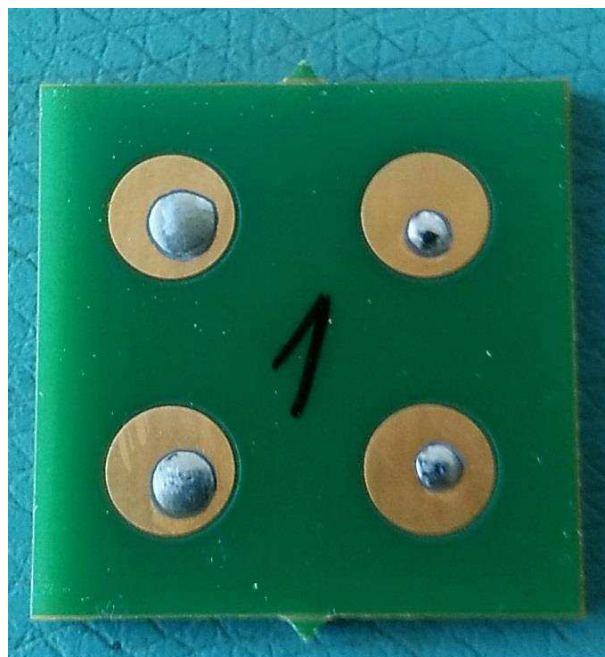
				Plošky					
ENIG	Reflow	Průměry (mm)	Vzorek	1-1	2-1	1-2	2-2		
			1	2,702	1,651	2,537	1,726		
2	2,687	1,651	2,582	1,771					
3	2,762	1,741	2,567	1,786					
4	2,732	1,756	2,567	1,771					
	Absolutní průměr	-	2,72	1,7	2,56	1,76			
	Smáčecí úhel (°)	-	11,12	16,09	11,85	16,5			
ENIG	Kondukce	Průměry (mm)	5	2,882	1,771	2,552	1,786		
			6	2,792	1,831	2,552	1,801		
			7	2,777	1,771	2,567	1,786		
			8	2,927	1,846	2,642	1,906		
			Absolutní průměr	-	2,84	1,8	2,58	1,82	
			Smáčecí úhel (°)	-	9,78	13,59	11,58	14,94	
Imerzní Sn	Reflow	Průměry (mm)	9	2,822	1,966	2,747	1,981		
			10	2,852	1,996	2,747	1,981		
			11	2,882	1,906	2,672	1,891		
			12	2,852	1,951	2,657	1,981		
			Absolutní průměr	-	2,85	1,95	2,71	1,96	
			Smáčecí úhel (°)	-	9,67	10,76	10,01	12	
	Imerzní Sn	Kondukce	Průměry (mm)	13	2,912	2,086	2,897	2,116	
				14	3,092	2,071	2,957	2,281	
				15	2,942	2,041	2,942	2,296	
				16	2,852	1,951	2,657	1,981	
				Absolutní průměr	-	2,95	2,04	2,86	2,17
				Smáčecí úhel (°)	-	8,73	9,41	8,52	8,89

Po přetavení pájky byl kupon vložen pod mikroskop a změřen průměr vrchlíku pájky. Po sérii rovnic 4.1 až 4.6 se vytvořila Tabulka 5-10.



Obr. 5-9: Vyhodnocení smáčecích úhlů solder spread test

Z naměřených hodnot se sestavil graf na Obr. 5-9. Zde na obou povrchových úpravách došlo k nejhoršímu smáčecímu úhlu u reflow přetavení s průměrem otvoru 1,5 mm. Nejlepších výsledků se naopak dosáhlo u pájení konduktance s průměrem otvoru 2,5 mm. Zjistila se tak závislost výše smáčecího úhlu na způsobu přetavení, a především na rozměrech otvoru



Obr. 5-10: Testovací kupon solder spread test po přetavení – ENIG

v šabloně. Pokud je tloušťka šablony stejná, pak platí: Čím větší je průměr otvoru, tím menší je výsledný smáčecí úhel. Jedná se však o zkreslení výsledků.

Výpočet smáčecího úhlu pro druhý sloupec:

$$V_{páj} = 0,1371 \text{ mm}^3$$

$$\rho = \frac{1,7}{2} = 0,85 \text{ mm (vyčteno z tabulky)}$$

$$v^3 + 3\rho^2v - \frac{6V_{páj}}{\pi} = 0$$

$$v^3 + 3 \cdot 0,85^2v - \frac{6 \cdot 0,1371}{\pi} = 0$$

$$v = 0,12 \text{ mm}$$

$$r = \frac{\rho^2 + v^2}{2v} = \frac{0,85^2 + 0,12^2}{2 \cdot 0,12} = 3,07 \text{ mm}$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\rho}{r} = \sin^{-1} \frac{0,85}{3,07} = 16,09^\circ$$

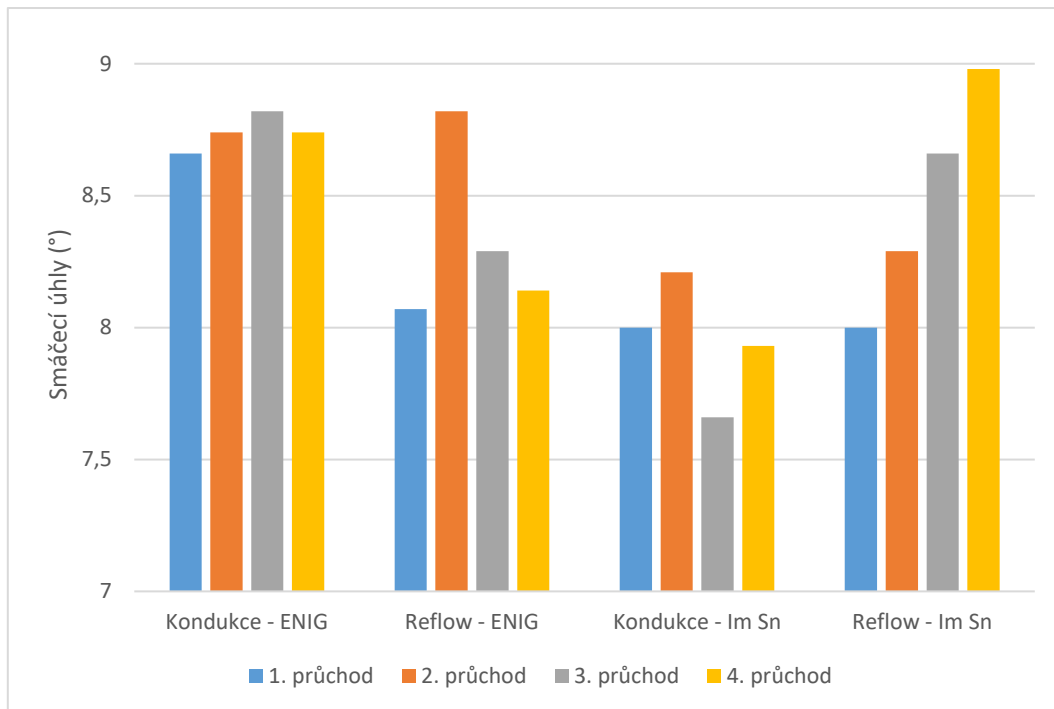
Kde $V_{páj}$ představuje objem pájky po přetavení v m^3 , ρ je poloměr vrchlíku pájky v m, v udává výšku vrchlíku pájky v m, r označuje poloměr koule, ze které je vrchlík tvořen v m a θ je smáčecí úhel ve $^\circ$.

5.4 Dewetting test

Jako poslední v rámci této bakalářské práce byl proveden dewetting test. Na testovací kupony s rozměry 10 x 10 mm byla přes šablonu s otvory o průměru 3 mm natisknuta pájecí pasta. Přetavení pájky bylo provedeno přes přetavovací pec a na roztavené pájce. Kupon byl celkem 4-krát přetaven s tím, že po každém přetavení byl vzorek vložen pod optický mikroskop, kde byl změřen průměr vrchlíku nanesené pasty. Stejně jako v případě solder spread test i zde byl vyhodnocován smáčecí úhel.

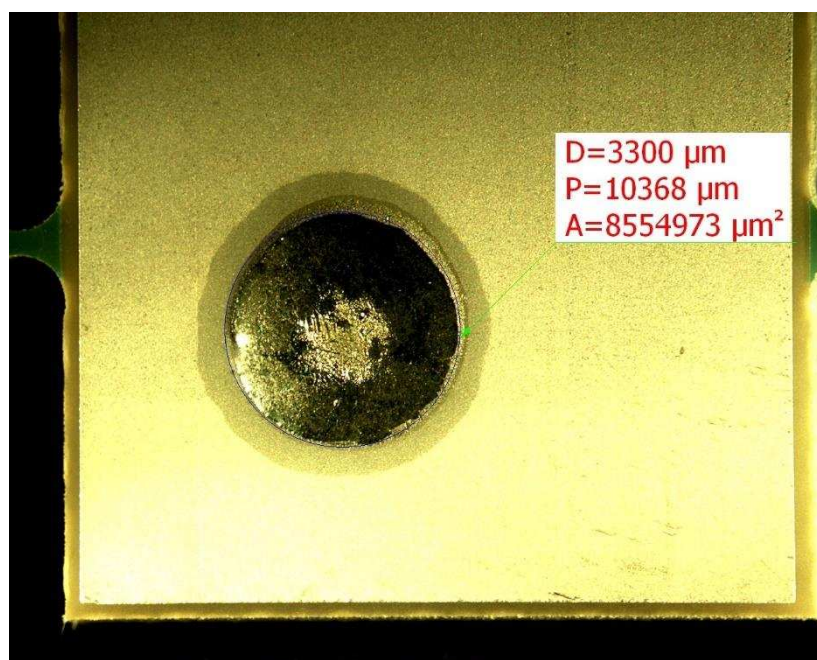
Tabulka 5-11: Naměřené a vypočtené hodnoty dewetting test

				Počet přetavení					
ENIG	Reflow	Průměry (mm)	Vzorek	1.	2.	3.	4.		
			1	3,444	3,372	3,462	3,48		
			2	3,408	3,39	3,444	3,462		
			3	3,372	3,211	3,335	3,354		
			4	3,426	3,282	3,282	3,3		
		Absolutní průměr	-	3,41	3,31	3,38	3,4		
		Smáčecí úhel (°)	-	8,07	8,82	8,29	8,14		
ENIG	Kondukce	Průměry (mm)	5	3,282	3,39	3,444	3,372		
			6	3,3	3,572	3,408	3,462		
			7	3,408	3,229	3,229	3,318		
			8	3,336	3,085	3,139	3,128		
			Absolutní průměr	-	3,33	3,32	3,31	3,32	
			Smáčecí úhel (°)	-	8,66	8,74	8,82	8,74	
Imerzní Sn	Reflow	Průměry (mm)	9	3,569	3,551	3,462	3,372		
			10	3,516	3,426	3,426	3,39		
			11	3,3	3,282	3,247	3,265		
			12	3,3	3,247	3,193	3,121		
			Absolutní průměr	-	3,42	3,38	3,33	3,29	
		Smáčecí úhel (°)	-	8	8,29	8,66	8,98		
	Imerzní Sn	Kondukce	Průměry (mm)	13	3,372	3,372	3,48	3,408	
				14	3,534	3,48	3,569	3,48	
				15	3,444	3,372	3,498	3,444	
				16	3,318	3,354	3,318	3,372	
				Absolutní průměr	-	3,42	3,39	3,47	3,43
				Smáčecí úhel (°)	-	8	8,21	7,66	7,93



Obr. 5-11: Smáčecí úhly – dewetting test

Graf na Obr. 5-11 znázorňuje smáčecí úhly pájky na povrchové úpravě imerzní cín a ENIG po 1. až 4. přetavení. Podle teorie, že smáčecí úhel se bude zvyšovat se zvyšujícím počtem přetavení, platilo pouze u imerzního cínu při pájení průchodem pecí. U zbylých vyhodnocení byly hodnoty rozkolísané a neodpovídaly očekávanému průběhu. Rozdíly smáčecích úhlů se však pohybovaly v desetínách stupně. Mohlo tak dojít k odchylce způsobené subjektivním měřením průměru.

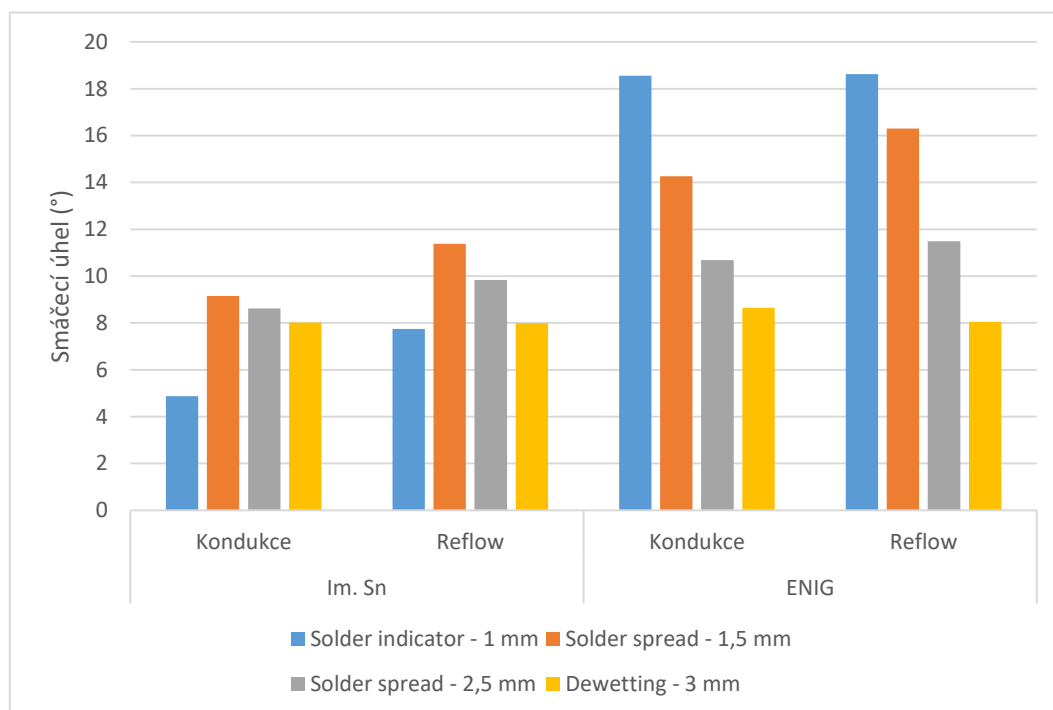


Obr. 5-12: Záznam z měření po 1. přetavení – úprava imerzní cín

6 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

6.1 Porovnání metod

V rámci této bakalářské práce byly porovnány tři zkušební metody, které se zabývaly měřením smáčecího úhlu pomocí přetavení pájecí pasty SAC 305 na povrchové úpravě ENIG a imerzní cín. V každé metodě byl použit jiný průměr otvoru v šabloně. Níže jsou porovnány metody mezi sebou a stanoven vliv průměru otvoru na výsledném smáčecím úhlu.



Obr. 6-1: Výsledné porovnání metod z hlediska smáčecího úhlu

Graf na Obr. 6-1 zobrazuje konečné porovnání metod. U každé metody je uveden průměr otvoru, přes který byla pájecí pasta na plošku nanášena. Z naměřených hodnot lze vyčíst, že se zvyšujícím se průměrem otvoru je smáčecí úhel nižší. Toto zkrácení výsledku je způsobeno tím, že tloušťka šablony je stejná, zatímco otvor je širší, tím je pasta o stejné výšce rozetřena na větší plochu. Ve výsledku se tak projeví jako menší smáčecí úhel. Měření je tím přesnější, čím menší je průměr otvoru a k tomu úměrná tloušťka šablony.

Tomuto pravidlu odpovídají výsledky změřené na povrchové úpravě ENIG po přetavení pájecí pecí, tak i plutí po roztavené pájce. Závislost změny smáčecího úhlu na průměru otvoru u imerzního cínu je menší, než tomu bylo u úpravy ENIG, avšak metoda solder indicator vykazuje jisté anomálie. Smáčecí úhel je zde poloviční, než tomu bylo u ostatních měřících metod. Patrně vlivem menšího smáčecího úhlu na úpravě imerzní cín docházelo ke shlukování velkého množství pájky. To způsobilo větší roztékání a nabírání další roztečené pájky, tím se sloupec pájky zvětšil. Také během tisku mohlo dojít k nanesení nepřesného objemu pájecí pasty, jelikož bylo tisknuto ručně, kdy není vždy dodržen přesný úhel terky, síla ani rychlost, což mohlo způsobit rozptýl výsledného smáčecího úhlu. Z tohoto důvodu nebylo dosaženo přesné hodnoty, protože metoda solder indicator smáčecí úhel vyhodnocovala pouze ze vzdálenosti mezi kuličkami pájky.

Metoda smáčecích vah nebyla z hlediska smáčecího úhlu s ostatními metody porovnávána, protože byla založena na ponoření vzorku do roztavené pájky. Na výslednou sílu působila jak smáčecí síla, tak nesmáčivá síla, které způsobovaly neplátované hrany vzorku. Smáčecí váhy tak simulovaly metodu pájení vlnou, zatímco ostatní metody simulovaly pájení přetavením. Pájecí pasta SAC 305 také obsahovala přírodní VOC FREE tavidlo, zatímco u metody smáčecích vah bylo použito tavidlo Decoflux AB-103-30-0. Z těchto důvodů by výsledky spolu nekorespondovaly.

6.2 Návrh pro inovaci metody solder indicator

Metoda se ukázala pro povrchovou úpravu ENIG jako uspokojivá (viz. Obr. 6-1), ovšem pro povrchovou imerzní cín a její nižší smáčecí úhel se ukázala jako velmi nepřesná. Z tohoto důvodu je potřeba metodu upravit, aby z důvodu spojování kuliček nedocházelo ke shlukování velkého množství pájky a ovlivnění tak výsledného smáčecího úhlu.

6.2.1 Změna průměru otvorů v šabloně

Jedna z možností, jak zamezit shlukování většího množství pájky je zmenšit objem testovaných kuliček. Aby však došlo pouze ke zmenšení kuliček a jejich počet na danou délku plošky zůstal stejný, bude vzdálenost středů otvorů v šabloně stejná, z hlediska úpravy tak naprosto postačí pouze zmenšit otvory v šabloně, deska se nemusí nijak upravovat a souřadnice otvorů na šabloně zůstávají zachovány.

Levá část Tabulky 6-1 byla sestavena stejně, jako tomu bylo u Tabulky 4-1. Je zde patrné, že zmenšení průměru otvorů o 10 % zvětší pole působnosti plošky o 20 %. Protože smáčecí úhel na povrchové úpravě ENIG se pohybuje kolem 18 °, dojde i u tohoto návrhu ke spojení dostatečného počtu kuliček pro vyhodnocení smáčecího úhlu. Celkový objem kuliček je menší a jejich počet zůstává zachován.

Nevýhoda tohoto návrhu je, že vzhledem k menšímu průměru otvoru může dojít k horšímu upnutí pájecí pasty na testovací plošku. Množství natisknuté pasty je totiž závislé i na průměru otvoru. [4]

6.2.2 Změna vzdálenosti otvorů

Další možnou variantou, jak zamezit většímu stékání pasty, je vytvořit větší rozestup mezi otvory v šabloně. Množství kuliček pro vyhodnocení zůstane zachováno, avšak délka pájecí plošky bude muset být prodloužena z původních 50 mm na 55 mm. Přitom délka testovaného kuponu 70 mm. Velikost kuponu by tak zůstala zachována.

Pravá část Tabulky 6-1 byla vytvořena z původní Tabulky 4-1. Zůstal zachován průměr 1 mm a první vzdálenost 0,1 mm. Poté je každá druhá mezera mezi otvory zvětšena o 0,08 mm. Krok, s jakým byly zvětšovány rozestupy, není vyšší z důvodu velikosti smáčecího úhlu na povrchové úpravě ENIG.

Nevýhoda tohoto návrhu je správné vybalancování měření smáčecích úhlů jak pro povrchovou úpravu ENIG, tak pro imerzní cín.

Tabulka 6-1: Návrh inovace metody solder indicator

Otvory 0,9 mm s krokem 0,065			Otvory 1 mm s krokem 0,08		
Vzdálenosti středů [mm]	Vzdálenosti [mm]	Smáčecí úhel [°]	Vzdálenosti středů [mm]	Vzdálenosti [mm]	Smáčecí úhel [°]
1,100	0,200	22,92	1,100	0,100	27,91
1,165	0,265	19,43	1,180	0,180	22,96
1,230	0,330	16,72	1,260	0,260	18,98
1,295	0,395	14,35	1,340	0,340	15,97
1,360	0,460	12,41	1,420	0,420	13,45
1,425	0,525	10,79	1,500	0,500	11,42
1,490	0,590	9,45	1,580	0,580	9,78
1,555	0,655	8,32	1,660	0,660	8,44
1,620	0,720	7,36	1,740	0,740	7,33
1,685	0,785	6,54	1,820	0,820	6,41
1,750	0,850	5,84	1,900	0,900	5,63
1,815	0,915	5,24	1,980	0,980	4,98
1,880	0,980	4,71	2,060	1,060	4,42
1,945	1,045	4,26	2,140	1,140	3,95
2,000	1,100	3,91	2,220	1,220	3,53

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá smáčivostí povrchových úprav a porovnáním měřících metod. Pro tuto práci byla navržena a zhotovena zkušební deska s povrchovými úpravami imerzní cín a ENIG. Kupony ze zkušební desky byly měřeny metodou solder indicator, wetting balance test metodou, solder spread test a dewetting test, přičemž prvním dvěma metodám byla věnována vyšší pozornost z hlediska návrhu. Metody solder indicator, solder spread a dewetting byly prováděny nanesením pájecí pasty SAC 305 na testované plošky. Pasta byla následně přetavena průchodem přetavovací pecí nebo položením kuponu na roztavenou pájku SAC 305 o teplotě 260 °C. Zmíněné metody měly za úkol simulovat chování povrchové úpravy během reflow pájení. Wetting balance test metoda měla za úkol simulovat pájení vlnou.

V teoretické části se práce věnuje problematice povrchových úprav, jak výrobní technologií, tak jejich výhodám a nevýhodám a vzájemně je porovnává. Poté práce zmiňuje defekty povrchových úprav při nedodržení správného postupu a špatným zacházením. Dále pak obsahuje vlastnosti pájecích slitin, teorii smáčivosti a izotermálního stárnutí materiálu. Poslední teoretická část popisuje pracovní postup všech použitých měřících metod.

V první části praktického měření se prováděla metoda solder indicator, kdy se vyhodnocovaly smáčecí charakteristiky pomocí spojených kuliček a vytvoření souvislého sloupce pájky na testovaných ploškách. Nejlepších výsledků po 1. přetavení bylo dosaženo u povrchové úpravy imerzní cín, kdy největší spojení kuliček bylo po přetavení na roztavené pájce. U výsledného smáčecího úhlu docházelo k velkému rozptylu parametrů, protože metoda vyhodnocuje úhel z dvou spojených vrchlíků pájky, které měly mezi sebou největší mezeru. Během ručního šablonového tisku mohlo dojít k nanesení nepřesného objemu pájecí pasty, protože nebyl vždy dodržen přesný úhel těrky, rychlost ani tlak tisku. To mohlo způsobit anomálie, které se projeví spojením vrchlíků, jež byly mimo sloupec pájky a tím tak ovlivnily vyhodnocení smáčecího úhlu. Povrchová úprava ENIG naproti imerznímu cínu vykazovala horší smáčecí charakteristiky, jak z hlediska spojení kuliček, tak výsledného smáčecího úhlu. Na druhou stranu zde nebyl tak velký rozptyl parametrů, jako tomu bylo u imerzního cínu. Po přetavení byla odvrácená strana kuponu použita pro měření tepelně namoženého povrchu. První strana byla zbavena pájky pomocí odsávačky. Plošky na druhé straně byly očištěny izopropylalkoholem a opět byla natisknuta pájecí pasta. Po druhém přetavení byly nejlepší smáčecí charakteristiky dosaženy u úpravy ENIG, kdy se jeho smáčecí úhel snížil u reflow pájení o 0,86 % a u pájení kondukcí o 13 %. Naproti tomu imerzní cín vykazoval mnohonásobně horší smáčecí charakteristiky a po 2. přetavení kondukcí se povrch stal nesmáčivým. Mohl za to především vzrůst intermetalické vrstvy a oxidace povrchu. Při tomto měření se ENIG ukázal jako více stabilní povrchová úprava, jak bylo předpokládáno podle teorie.

V druhé části se provádělo měření testovaných vzorků na smáčecích vahách. Pro měření byly použity dva různě tlusté vzorky s povrchovou úpravou imerzní cín a ENIG. Vzorky byly měřeny hned po vyjmutí z obalu a nebyly nijak zatěžovány. Nejlepší smáčecí charakteristiky vykazovala povrchová úprava imerzní cín. ENIG vykazoval horší smáčecí charakteristiky. U vzorků s tloušťkou 1,56 mm byly smáčecí charakteristiky pod nulovou osou přístroje a těsně nad vypočítanou korigovanou nulou, zatímco vzorky s tloušťkou 1 mm měly maximální smáčecí sílu nad nulovou osou meniskografu a mnohonásobně výše nad svou korigovanou nulou. Po vyhodnocení se ukázalo, že výše korigované nuly prvního a druhého typu vzorků nejsou tak odlišné, jako výše maximální smáčecí síly. Dá se tak předpokládat, že tloušťka vzorku s neplátovanými bočními stranami silně ovlivňuje měření, jak z hlediska rychlosti smáčivosti, tak maximální smáčecí sil. Rozdíl tloušťky 0,56 mm vykazoval zvýšení $t_{2/3}$ téměř o dvojnásobek, zatímco rozdíl nesmáčivé plochy činil 6,16 mm a měl za následek snížení maximální smáčecí síly přibližně o 1,5 mN.

Následující měřicí metoda obsahovala vyhodnocení smáčecího úhlu pomocí metody solder spread test. Na kruhové plošky pokryté imerzním cínem nebo úpravou ENIG byla přes šablonu s kruhovými otvory s průměry 2,5 mm a 1,5 mm nanášena pájecí pasta, která byla následně přetavena v peci nebo na roztavené pájce SAC 305 o teplotě 260 °C. Po přetavení byl průměr vrchlíku pájky změřen na optickém mikroskopu a vlastně navrženou vyhodnocující metodou byl vypočten smáčecí úhel. Při tomto testu opět imerzní cín vykazoval lepší smáčecí úhel než úprava ENIG. Ovšem při větším množství nanášené pájky na úpravě ENIG docházelo ke snižování smáčecího úhlu a blížil se k hodnotám imerzního cínu. Po vynesení výsledků do grafu bylo zjištěno, že smáčecí úhel na obou úpravách byl závislý na způsobu přetavení, a především na průměru otvoru v šabloně.

Jako poslední se prováděl dewetting test. Na čtvercové plošky, které byly celé pokryté povrchovou úpravou ENIG nebo imerzním cínem, byla nanášena pájecí pasta. Ta byla přetavena buď v přetavovací peci, nebo na roztavené pájce SAC 306. Po přetavení pasty se, stejně jako v případě solder spread test, vzorky umístily pod optický mikroskop a byl změřen průměr vrchlíku pájky. Po změření byl vzorek opět přetaven a proces se opakoval. Tímto způsobem byl změřen rozdíl smáčecího úhlu po čtyřech přetaveních. Úhel se zvyšoval s přibývajícím přetavením pouze u imerzního cínu přetaveného v peci. Podobnou závislost vykazovala úprava ENIG u přetavení pomocí konduktivity. Rozdíly ve smáčecích úhlech se však pohybovaly v desetinách stupňů. Z tohoto hlediska se dá tak předpokládat, že tak malá změna úhlu mohla být způsobena subjektivním změřením průměru vrchlíku kuličky, jelikož po přetavení se nevytvořil dokonale kulatý vrchlík pájky.

Nakonec byly mezi sebou porovnány metody využívající přetavení pájecí pasty. Metoda smáčecích vah nebyla s ostatními metodami porovnána z důvodu odlišného principu metody a použití jiného tavidla. Bylo dokázáno, že při zvětšování otvoru dochází ke zkreslení výsledného smáčecího úhlu z důvodu větší plochy natisknuté pasty o stejné výšce. Smáčecí úhel na povrchové úpravě imerzní cín byl u metody solder indicator silně zkreslen z důvodu shlukování velkého množství pájky a anomáliemi způsobené větší citlivostí imerzního cínu na přesnost nanášení pájecí pasty. Pro snížení tohoto zkreslení bylo navrženo: zmenšit otvorům jejich průměr, ale ponechat jejich souřadnice, nebo otvorům ponechat již navržený průměr, ale zvětšit jejich rozestupy a prodloužit tak celou testovací plošku.

Smyslem této bakalářské práce bylo především navrhnout a ozkoušet prvotní návrhy zkušební desky obsahující testovací kupony s pájecími ploškami. Na těch by se prováděly pravidelné zkoušky výrobních testů. Dále pak pro každou zkoušku vymyslet vyhodnocovací metodu, zjistit její nedostatky a navrhnout řešení. Do budoucna se předpokládá zdokonalování prováděných testů a jejich vyhodnocování.

LITERATURA

- [1] MINÁŘ, J. Smáčivost povrchových úprav DPS. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [2] HANSON, Robyn J. Electronics Surface Finish Overview. MacDermid [online]. 2015, 56 [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: http://www.smta.org/chapters/files/UMW_SMTA_Surface_Finish_June_2015_-_Hanson.pdf
- [3] Printed Circuit Board and Plated-Through Hole (PTH) Information [online]. [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: <http://www.xmultiple.com/xwebsite-forum8826printedcircuitboard.htm>
- [4] STARÝ, J., KAHLE, P. Plošné spoje a povrchová montáž Elektronické skriptum Brno: FEKT VUT v Brně, 2003
- [5] Povrchové úpravy Semach chemický cín Ormecon [online]. [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: <http://www.semach.cz/povrchy3.html>
- [6] SURFACE FINISHES: Technical Webinar [online]. , 15 [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: <http://www.epectec.com/downloads/surface-finishes.pdf>
- [7] JIČÍNSKÝ, J. Environmentální vlivy a pájitelnost povrchových úprav desek plošných spojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 55s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [8] OSP = Organic Surface Protection = for Printed Circuit Boards A Question of Continental Preference [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: http://www.precoplat.com/tec_tpl/technik_tpl.php?cnt=cnt_prod_osp.php
- [9] LAMPRECHT, Sven a Carl HUTCHINSON. Immersion Tin – Kinetics of Whisker growth [online]. , 5 [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.495.8968&rep=rep1&type=pdf>
- [10] Basic Information Regarding Tin Whiskers [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <https://nepp.nasa.gov/WHISKER/background/>
- [11] VIANCO, Paul T. An overview of surface finishes and their role in printed circuit board solderability and solder joint performance. Circuit World [online]. 1999, , 22 [cit. 2017-03-28]. ISSN 0305-6120. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/03056129910244518>
- [12] Metoda smáčecích vah [online]. smtcentrum [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/metoda-smacecich-vah/>
- [13] HUSÁK, Jiří. Měření pájitelnosti metodou smáčecích vah při tenzi par. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Karel Dušek, Ph.D.
- [14] DSP 862 LEAD FREE NO CLEAN SOLDER PASTE. Qualitek [online]. Qualitek [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: https://www.qualitek.com/europe_862_Leadfree.pdf
- [15] Vídeňský, Ondřej. Smáčivost povrchových úprav DPS a porovnání metod. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2016. 32 s. Semestrální projekt. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [16] Kruhová úseč. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kruhov%C3%A1_%C3%BAse%C4%8D

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

OSP	Organic Surface Protection
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold
θ	Smáčecí úhel
γ	Povrchové napětí
p	Obvod vzorku
d	Průměr vzorku
g	Gravitační zrychlení
ρ	Hustota
V	Objem
m	Hmotnost
F_{vz}	Archimedova vztlaková síla
F_{max}	Maximální smáčecí síla
F_2	Součet maximální smáčecí síly a vztlakové síly
$F_{2/3}$	2/3 síly F_2
$t_{2/3}$	Čas, kdy je dosaženo síly $F_{2/3}$
v	Výška vrchlíku pájky
V_{paj}	Objem pájky

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1: Podíl povrchových úprav na celosvětovém trhu (převzato z [2]).	4
Obr. 2-1: Ukázka cínového whiskeru (převzato z [2])	8
Obr. 3-1: Působení sil během tavení	11
Obr. 4-1: Navržená testovací deska verze 1 s logem Gatemy a VUT	13
Obr. 4-2: Grafické zobrazení výpočtu smáčecího úhlu	14
Obr. 4-3: Naměřený teplotní profil kuponu na roztavené pájce SAC 305	17
Obr. 4-4: Naměřený teplotní profil dvou po sobě jdoucích desek	17
Obr. 4-5: Topné hnízdo THS 500 s pájkou SAC 305	18
Obr. 4-6: Naměřený teplotní profil přetavovací pece DIMA SMRO 180	18
Obr. 4-7: Blokové zapojení meniskofragu (převzato z [1])	19
Obr. 4-8: Křivka smáčecí síly (převzato z [1])	20
Obr. 4-9: Síla F _{2/3} v čase t _{2/3} (převzato z [1])	21
Obr. 5-1: Graf smáčecích úhlu – solder indicator	22
Obr. 5-2: Graf spojení kuliček – solder indicator	23
Obr. 5-3: Solder indicator – imerzní cín po 1. přetavení	23
Obr. 5-4: Solder indicator – imerzní cín po 2. přetavení	24
Obr. 5-5: Ukázka nesmáčivosti po 2. přetavení kondukcí u imerzního cínu	24
Obr. 5-6: Měřicí stanice s meniskografem	25
Obr. 5-7: Smáčecí charakteristiky obou typů vzorků	26
Obr. 5-8: Maticové rozdělení plošek na kuponu	28
Obr. 5-9: Vyhodnocení smáčecích úhlů solder spread test	30
Obr. 5-10: Testovací kupon solder spread test po přetavení – ENIG	30
Obr. 5-11: Smáčecí úhly – dewetting test	33
Obr. 5-12: Záznam z měření po 1. přetavení – úprava imerzní cín	33
Obr. 6-1: Výsledné porovnání metod z hlediska smáčecího úhlu	34

SEZNAM TABULEK

Tabulka 4-1: Nejmenší smáčecí úhel pro vzdálenosti mezi aperturami a středy apertur (otvorů) v šabloně	15
Tabulka 5-9: Naměřené a vypočtené hodnoty pro oba druhy vzorku.....	26
Tabulka 5-10: Naměřené a vypočtené hodnoty solder spread test	29
Tabulka 5-11: Naměřené a vypočtené hodnoty dewetting test.....	32
Tabulka 6-1: Návrh inovace metody solder indicator	36
Tabulka 5-1: 1. průchod solder indicator s imerzním cínem – vyhodnocení kuliček.....	44
Tabulka 5-2: 1. průchod solder indicator s ENIG – vyhodnocení kuliček	45
Tabulka 5-3: 1. průchod solder indicator s imerzním cínem – vyhodnocení sloupce	46
Tabulka 5-4: 1. průchod solder indicator s ENIG – vyhodnocení sloupce.....	47
Tabulka 5-5: 2. průchod solder indicator s imerzním cínem – vyhodnocení kuliček.....	48
Tabulka 5-6: 2. průchod solder indicator s ENIG – vyhodnocení kuliček	49
Tabulka 5-7: 2. průchod solder indicator s imerzním cínem – vyhodnocení sloupce	50
Tabulka 5-8: 2. průchod solder indicator s ENIG – vyhodnocení sloupce.....	51

Příloha A – Testovací deska firmy Atotech



Materials Science Berlin

2. General View of Selective Finishing Test Board (SFTB1)

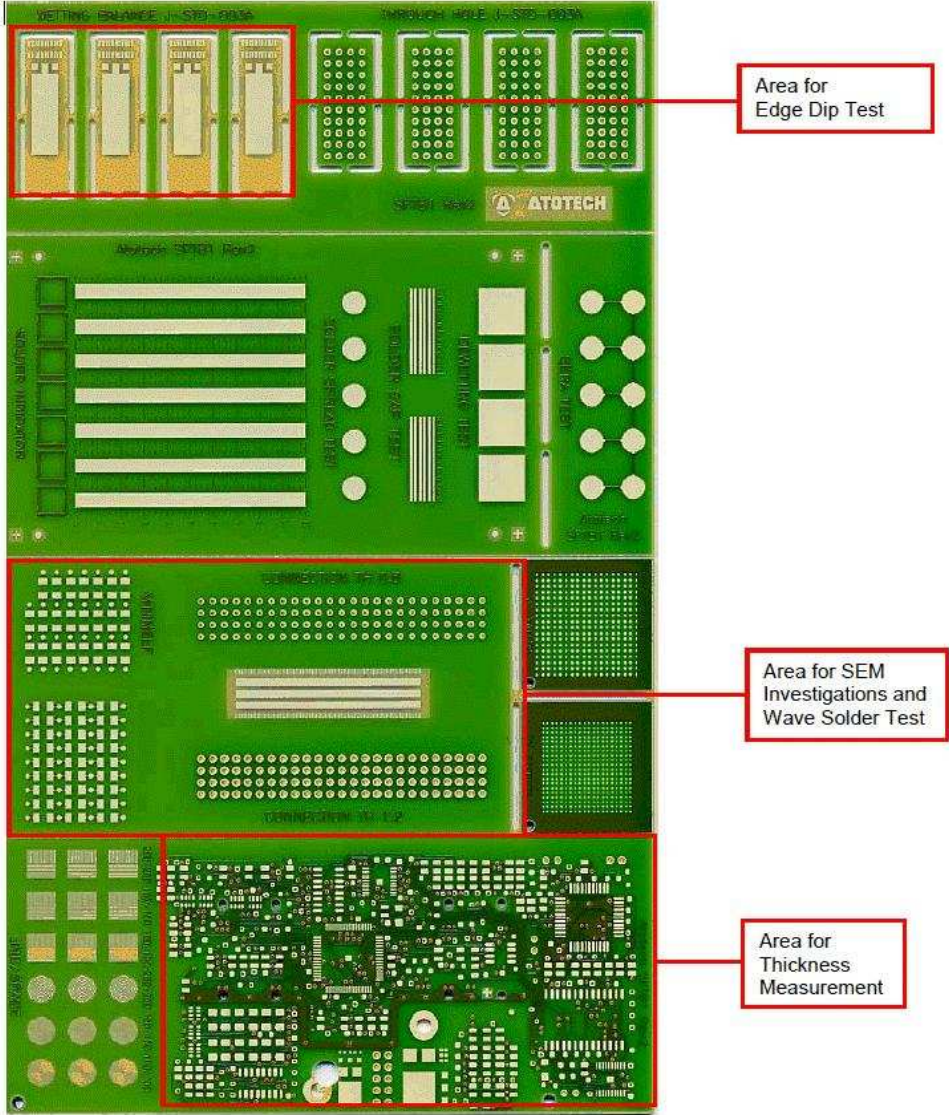


Image ID: 1 SFTB1.Front Side

Příloha B – Tabulky naměřených hodnot solder indicator

Tabulka 5-1: 1. průchod solder indicator s imerzním cínem – vyhodnocení kuliček

Imerzní cín								
Reflow								
Vzorky	Ref 1	Ref 2	Ref 3	Ref 4	Ref 5	Ref 6	Ref 7	Ref 8
Počet spojených kuliček	17	17	25	19	18	16	18	20
	19	16	20	20	28	16	18	18
	19	20	16	17	16	16	17	18
	19	18	16	18	15	14	16	13
Průměr	19	18	19	19	19	16	17	17
Spojení (%)	63,33	60	63,33	63,33	63,33	53,33	56,67	56,67
Smáčecí úhel (°)	7,24	7,24	4,83	8,1	9,1	9,1	9,1	7,24
Celkový průměr kuliček	18		Celkový průměr %	60		Celkový průměr úhlu (°)	7,74	
Konduktce								
Vzorky	Kon 1	Kon 2	Kon 3	Kon 4	Kon 5	Kon 6	Kon 7	Kon 8
Počet spojených kuliček	26	30	25	24	27	21	16	25
	18	28	29	28	26	21	20	24
	18	28	27	27	29	17	18	22
	25	27	21	24	25	14	10	22
Průměr	22	28	26	26	27	18	16	23
Spojení (%)	73,33	93,33	86,67	86,67	90	60	53,33	76,67
Smáčecí úhel (°)	4,83	4,83	4,83	4,83	4,83	5,25	4,83	4,83
Celkový průměr kuliček	23		Celkový průměr %	77,5		Celkový průměr úhlu (°)	4,88	

Tabulka 5-2: 1. průchod solder indicator s ENIG – vyhodnocení kuliček

ENIG								
Reflow								
Vzorky	Ref 1	Ref 2	Ref 3	Ref 4	Ref 5	Ref 6	Ref 7	Ref 8
Počet spojených kuliček	7	6	6	4	5	4	3	6
	8	6	8	6	6	6	6	8
	8	8	7	5	8	5	5	8
	7	6	6	4	5	4	5	5
Průměr	8	7	7	5	6	5	5	7
Spojení (%)	26,67	23,33	23,33	16,67	20	16,67	16,67	23,33
Smáčecí úhel (°)	17,58	17,58	17,58	20,37	17,58	20,37	20,37	17,58
Celkový průměr kuliček	6		Celkový průměr %	20,83		Celkový průměr úhlu (°)	18,63	
Konduktce								
Vzorky	Kon 1	Kon 2	Kon 3	Kon 4	Kon 5	Kon 6	Kon 7	Kon 8
Počet spojených kuliček	8	8	2	13	6	5	2	0
	8	8	4	9	7	6	4	2
	8	7	6	6	7	5	4	2
	8	7	4	7	6	4	4	4
Průměr	8	8	4	9	7	5	4	2
Spojení (%)	26,67	26,67	13,33	30	23,33	16,67	13,33	6,67
Smáčecí úhel (°)	17,58	17,58	20,37	10,27	17,58	17,58	23,76	23,76
Celkový průměr kuliček	6		Celkový průměr %	19,58		Celkový průměr úhlu (°)	18,56	

Tabulka 5-3: 1. průchod solder indicator s imerzním cínem – vyhodnocení sloupce

Imerzní cín								
Reflow								
Vzorky	Ref 1	Ref 2	Ref 3	Ref 4	Ref 5	Ref 6	Ref 7	Ref 8
Celková délka spojené pájky (mm)/počet mezer	23,18/2	19,56/3	32,89/5	29,64/4	24,67/2	22,57/3	24,39/2	33,34/6
	22,94/1	21,26/1	24,58/3	27,88/3	24,66/3	21,2/4	24,44/3	24,58/3
	29,73/5	31,18/5	22,75/2	22,58/3	22,8/2	22,2/3	22,57/3	24,3/3
	29,73/7	26,12/4	21,17/3	25,9/5	19,78/2	21,3/4	21,34/2	17/2
Průměr	26,4/4	24,53/3	25,35/3	26,5/4	22,98/3	21,82/3	23,19/3	24,81/4
Prům. délka (%)	55	51,1	52,81	55,21	47,88	45,46	48,31	51,69
Celkový průměr (mm)/mezer		24,45/3		Celková prům. délka (%)		50,93		
Kondukce								
Vzorky	Kon 1	Kon 2	Kon 3	Kon 4	Kon 5	Kon 6	Kon 7	Kon 8
Celková délka spojené pájky (mm)/počet mezer	35,42/3	42,11/0	43,46/7	45,19/9	37,3/1	26,75/4	18,61/1	37,22
	21,12/2	40,45/2	47,96/4	44,87/5	40,68/3	37,05/10	21,3/2	21,3/1
	24,57/2	47,13/5	33,58/1	44,72/6	44,8/0	19,62/5	21,25/4	37,22/6
	29,88/6	36,5/3	26,32/0	26,85/3	37,15/0	22,74/7	15,12/2	31,9/3
Průměr	27,75/3	41,55/3	37,83/3	40,41/6	39,98/1	26,54/7	19,07/2	31,91/3
Prům. délka (%)	57,81	86,56	78,81	84,19	83,29	55,26	39,73	66,48
Celkový průměr (mm)/mezer		33,13/4		Celková prům. délka (%)		69,02		

Tabulka 5-4: 1. průchod solder indicator s ENIG – vyhodnocení sloupce

ENIG								
Reflow								
Vzorky	Ref 1	Ref 2	Ref 3	Ref 4	Ref 5	Ref 6	Ref 7	Ref 8
Celková délka spojené pájky (mm)/počet mezer	8,23/1	7,14/0	7,25/0	4,55/0	5,64/0	4,63/0	3,56/0	7,25/0
	9,76/2	7,26/1	9,85/2	7,11/1	7,25/1	7,25/1	7,03/1	9,62/1
	9,48/1	9,6/1	9,85/2	5,84/0	9,82/1	5,91/0	5,86/1	9,91/1
	9,7/2	6,02/0	7,16/0	4,61/0	5,76/0	5,92/0	5,86/0	5,97/0
Průměr	9,29/2	7,51/1	8,53/1	5,53/0	7,12/1	5,93/0	5,58/1	8,19/1
Prům. délka (%)	19,35	15,65	17,77	11,52	14,83	12,35	11,63	17,06
Celkový průměr (mm)/mezer		7,21/1		Celková prům. délka (%)		15,02		
Konduktance								
Vzorky	Kon 1	Kon 2	Kon 3	Kon 4	Kon 5	Kon 6	Kon 7	Kon 8
Celková délka spojené pájky (mm)/počet mezer	9,75/0	9,6/0	4,68/2	19,82/2	7/0	5,77/1	2,33/0	0/0
	10/1	9,73/1	4,75/1	11,38/1	9,63/2	9,7/4	4,33/1	2/0
	9,70	8,35/0	7,14/1	7,16/1	8,3/1	7/2	4,33/1	2/0
	9,53/0	8,35/0	4,5/1	8,44/0	6,95/0	4,65/1	4,33/1	4,7/1
Průměr	9,75/0	9,01/0	5,27/1	11,7/1	7,97/1	6,78/2	3,83/1	2,18/0
Prům. délka (%)	20,31	18,77	10,98	24,38	16,6	14,13	7,98	4,54
Celkový průměr (mm)/mezer		7,06/1		Celková prům. délka (%)		14,71		

Tabulka 5-5: 2. průchod solder indicator s imerzním cínem – vyhodnocení kuliček

Imerzní cíň								
Reflow								
Vzorky	Ref 1	Ref 2	Ref 3	Ref 4	Ref 5	Ref 6	Ref 7	Ref 8
Počet spojených kuliček	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
Průměr	0	0	0	0	0	0	0	0
Spojení (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
Smáčecí úhel (°)	-	-	-	-	-	-	-	-
Celkový průměr kuliček	0		Celkový průměr %	0		Celkový průměr úhlu (°)	30	
Konduktce								
Vzorky	Kon 1	Kon 2	Kon 3	Kon 4	Kon 5	Kon 6	Kon 7	Kon 8
Počet spojených kuliček	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
Průměr	0	0	0	0	0	0	0	0
Spojení (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
Smáčecí úhel (°)	-	-	-	-	-	-	-	-
Celkový průměr kuliček	0		Celkový průměr %	0		Celkový průměr úhlu (°)	>90	

Tabulka 5-6: 2. průchod solder indicator s ENIG – vyhodnocení kuliček

ENIG								
Reflow								
Vzorky	Ref 1	Ref 2	Ref 3	Ref 4	Ref 5	Ref 6	Ref 7	Ref 8
Počet spojených kuliček	4	6	6	4	5	6	4	5
	4	5	5	4	8	4	4	4
	4	5	5	7	7	6	7	6
	6	6	6	4	8	6	6	6
Průměr	5	6	6	5	7	6	5	5
Spojení (%)	16,67	20	20	16,67	23,33	20	16,67	16,67
Smáčecí úhel (°)	20,37	20,37	20,37	17,58	13,27	20,37	17,58	20,37
Celkový průměr kuliček	5		Celkový průměr %	18,75		Celkový průměr úhlu (°)	18,79	
Konduktance								
Vzorky	Kon 1	Kon 2	Kon 3	Kon 4	Kon 5	Kon 6	Kon 7	Kon 8
Počet spojených kuliček	3	5	4	5	2	4	2	4
	4	5	7	4	2	4	4	4
	2	5	6	8	4	5	3	4
	4	6	7	7	4	6	2	6
Průměr	3	5	6	6	3	5	3	5
Spojení (%)	10	16,67	20	20	10	16,67	10	16,67
Smáčecí úhel (°)	23,7	20,37	17,58	17,58	23,7	20,37	23,7	20,37
Celkový průměr kuliček	4		Celkový průměr %	15		Celkový průměr úhlu (°)	20,92	

Tabulka 5-7: 2. průchod solder indicator s imerzním cínem – vyhodnocení sloupce

Imerzní cíň								
Reflow								
Vzorky	Ref 1	Ref 2	Ref 3	Ref 4	Ref 5	Ref 6	Ref 7	Ref 8
Celková délka spojené pájky (mm)/počet mezer	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
Průměr	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
Prům. délka (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
Celkový průměr (mm)/mezery		0/0		Celková prům. délka (%)		0		
Kondukcce								
Vzorky	Kon 1	Kon 2	Kon 3	Kon 4	Kon 5	Kon 6	Kon 7	Kon 8
Celková délka spojené pájky (mm)/počet mezer	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
Průměr	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
Prům. délka (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
Celkový průměr (mm)/mezer		0/0		Celková prům. délka (%)		0		

Tabulka 5-8: 2. průchod solder indicator s ENIG – vyhodnocení sloupce

ENIG								
Reflow								
Vzorky	Ref 1	Ref 2	Ref 3	Ref 4	Ref 5	Ref 6	Ref 7	Ref 8
Celková délka spojené pájky (mm)/počet mezer	4,34/0	6,97/1	7,02/0	4,64/0	6,85/2	6,82/1	4,13/0	5,69/0
	4,36/0	6/0	5,58/0	4,54/0	12,22/5	4,49/0	4,52/0	4,52/0
	5,51/0	6/0	5,58/0	9,72/2	9,47/3	7,1/1	8,4/0	6,94/0
	6,73/2	7,02/1	7,02/1	4,56/0	6,82/2	7,1/2	7,4/1	6,94/1
Průměr	5,24/1	6,5/1	6,3/0	5,87/1	8,84/3	6,38/1	6,11/0	6,02/0
Prům. délka (%)	10,92	13,54	13,13	12,23	18,42	13,29	12,73	12,54
Celkový průměr (mm)/mezer		6,41/1		Celková prům. délka (%)		13,35		
Kondukce								
Vzorky	Kon 1	Kon 2	Kon 3	Kon 4	Kon 5	Kon 6	Kon 7	Kon 8
Celková délka spojené pájky (mm)/počet mezer	3,24/0	5,47/0	5,75/1	5,85/0	2,49/0	4,7/0	2,33/0	4,65/0
	4,46/1	5,81/0	9,41/0	4,16/1	2,49/0	4,42/1	4,21/1	4,38/0
	2,44/0	5,81/0	7,01/0	9,78/1	4,55/0	5,94/0	3,27/0	4,38/0
	4,39/1	7,03/1	7,02/1	8,37/1	4,55/1	7,26/1	2,24/0	6,79/0
Průměr	3,63/1	6,03/0	7,3/1	7,04/1	3,52/0	5,58/1	3,01/0	5,05/1
Prům. délka (%)	7,56	12,56	15,21	14,67	7,33	11,63	6,27	10,52
Celkový průměr (mm)/mezer		5,15/1		Celková prům. délka (%)		10,72		