



# 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

## KVALITA POVRCHOVÝCH ÚPRAV DPS A OPTIMALIZACE TESTOVACÍHO KUPÓNU

QUALITY OF PCB SURFACE FINISHES AND TEST COUPON  
OPTIMALIZATION

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Minář

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2018

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**  
Ústav elektrotechnologie

**Student:** Bc. Jan Minář

**ID:** 164341

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

### **Kvalita povrchových úprav DPS a optimalizace testovacího kupónu**

#### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Prostudujte problematiku povrchových úprav desek s plošnými spoji a podrobněji se soustředte na imerzní cín a chemický nikl s imerzním zlatem. Navrhněte a zpracujte metodiku sledování kvality povrchových úprav pro výrobní firmu.

Optimalizujte testovací šablonu i kupón na provádění pravidelných výrobních testů smáčivosti a zpracujte postup. Proměřte smáčecí charakteristiky a realizujte vybrané zkoušky na dodaných povrchových úpravách DPS.

Vyhodnoťte dosažené výsledky – úroveň smáčení, roztečení pájky po povrchu i odsmačení. Porovnejte výsledky dosažené přetavením pájecí pasty a metodou smáčecích vah.

Spolupráce s firmou Gatema Boskovice.

#### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 22.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Starý, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 diplomová práce se zabývá měřením a vyhodnocováním smáčivosti různých povrchových úprav DPS, pomocí testovacího kupónu vyvíjeného ve spolupráci s firmou Gatema. Věnuje se především povrchovým úpravám ENIG a imerzní cín, u kterých se zaměřuje na metodiku sledování kvality a provádění pravidelných testů kvality těchto povrchových úprav. Toto testování probíhá při použití pájecí slitiny SAC305. Jednotlivé testy simulují pájení přetavením i pájení vlnou.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Povrchové úpravy, imerzní cín, ENIG, metoda smáčecích vah, smáčivost, smáčecí charakteristiky, odsmáčení.

## **ABSTRACT**

This master's thesis deals with measuring and evaluation of wetting for samples of different surface finishes, using a test coupon developed in cooperation with firm Gatema. It deals with surface finishes ENIG and immersion tin. For these samples deals with quality monitoring and periodic testing of these surface finishes. The solder using for tests is SAC305. Test methods are used for simulation of reflow soldering and wave soldering.

## **KEYWORDS**

Surface finishes, immersion tin, ENIG, wetting balance method, wettability, wetting characteristics, dewetting.

MINÁŘ, J. *Kvalita povrchových úprav DPS a optimalizace testovacího kupónu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D..

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Kvalita povrchových úprav DPS a optimalizace testovacího kupónu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Úvod</b>                                                             | <b>8</b>  |
| <b>1 Povrchové úpravy</b>                                               | <b>9</b>  |
| 1.1 HAL (Hot Air Leveling) .....                                        | 9         |
| 1.2 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold).....                       | 10        |
| 1.3 Imerzní cín (Immersion Tin).....                                    | 12        |
| 1.4 ENEPIG (Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold) .. | 13        |
| <b>2 Pájecí slitiny</b>                                                 | <b>15</b> |
| 2.1 Sn63Pb37 .....                                                      | 16        |
| 2.2 SAC305.....                                                         | 16        |
| 2.3 SN100C.....                                                         | 16        |
| <b>3 Pájitelnost</b>                                                    | <b>17</b> |
| <b>4 Povrchové úpravy a enviromentální vlivy</b>                        | <b>19</b> |
| 4.1 Oxidace povrchu .....                                               | 19        |
| 4.2 Vliv vlhkosti na povrchové úpravy.....                              | 20        |
| 4.3 Vliv teploty na růst intermetalické vrstvy.....                     | 20        |
| 4.4 Zrychlené zkoušky .....                                             | 21        |
| <b>5 Metodika měření</b>                                                | <b>22</b> |
| 5.1 Testovací kupón .....                                               | 22        |
| 5.2 Wetting balance test.....                                           | 23        |
| 5.2.1 Smáčecí charakteristiky .....                                     | 24        |
| 5.2.2 Vyhodnocení metody podle normy.....                               | 26        |
| 5.3 Edge dip test.....                                                  | 29        |
| 5.4 Metoda solder indicator .....                                       | 30        |
| 5.5 Solder spread test .....                                            | 32        |
| 5.6 Dewetting test .....                                                | 35        |
| 5.7 Přetavení pomocí kondukce.....                                      | 36        |

|          |                                         |           |
|----------|-----------------------------------------|-----------|
| 5.8      | Přetavení v pájecí peci .....           | 37        |
| 5.9      | Izotermální stárnutí .....              | 38        |
| 5.10     | Mikrovýbrus.....                        | 38        |
| <b>6</b> | <b>Výsledky měření</b>                  | <b>39</b> |
| 6.1      | Wetting balance test.....               | 41        |
| 6.2      | Edge dip test.....                      | 48        |
| 6.3      | Solder indicator .....                  | 49        |
| 6.4      | Solder spread test .....                | 52        |
| 6.5      | Dewetting test .....                    | 57        |
| <b>7</b> | <b>Diskuze výsledků</b>                 | <b>58</b> |
|          | <b>Závěr</b>                            | <b>63</b> |
|          | <b>Literatura</b>                       | <b>65</b> |
|          | <b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b> | <b>67</b> |
|          | <b>Seznam obrázků</b>                   | <b>68</b> |
|          | <b>Seznam tabulek</b>                   | <b>70</b> |

# ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá měřením a testováním kvality povrchových úprav DPS pomocí testovacího kupónu vyvíjeným ve spolupráci s firmou Gatema. Dále jejich smáčivostí a vyhodnocováním jednotlivých pravidelných zkoušek.

V teoretické části se práce zabývá problematikou povrchových úprav, pájecích slitin a pájitelnosti. Dále rozebírá enviromentální vlivy, jako je zvýšená teplota nebo vlhkost, které mohou mít vliv na kvalitu povrchových úprav.

Další část se věnuje popisu testovacího kupónu pro pravidelné testování povrchových úprav. Způsob jejich realizace na testovací desce. Popisuje princip jednotlivých metod a popisuje způsob jejich vyhodnocení.

V praktické části se práce zaměřuje na provedení jednotlivých testů na vzorcích povrchových úprav ENIG a imerzní cín. V práci je dále uveden návrh metodiky testování kvality pro použití ve výrobní firmě.



# 1 POVRCHOVÉ ÚPRAVY

Jelikož jsou pájecí plošky na deskách plošných spojů tvořeny mědí, která na vzduchu velmi rychle oxiduje, je nutné je chránit před oxidací pomocí povrchových úprav. Vlivem zoxidovaného povrchu by totiž mohlo dojít ke špatnému smáčení, až nesmáčení povrchu, příp. i odsmáčení pájky během pájecího procesu. Povrchové úpravy slouží především jako ochrana povrchu desky před oxidací, díky čemuž dojde ke zvýšení možné doby skladovatelnosti DPS, a tedy je také zajištěna dobrá smáčivost i po delší době.

Vzhledem k tomu, že neexistuje jeden univerzální druh povrchové úpravy pro všechny používané aplikace, musí výrobce zvážit všechny výhody a nevýhody každé povrchové úpravy a vybrat nejlepší možnost pro konkrétní typ výrobku. Druh povrchové úpravy se vybírá především podle požadavků na následnou povrchovou montáž, nákladů na výrobu, ekologických aspektů (především použití bezolovnaté pájky), tloušťky nanášené vrstvy, rovinnosti vzniklého povrchu, možnosti kontaktování, vhodnosti pro fine pitch aplikace, eliminace teplotního šoku DPS a především možné doby skladovatelnosti. [1]

## 1.1 HAL (Hot Air Leveling)

Jedná se o metodu nanášení roztavené pájky na měděný podklad. Deska se ponoří do roztavené pájky, která pokryje pájecí plošky na desce. Během vytažení se její přebytek od foukne pomocí horkého vzduchu. Dříve byl HAL nejpoužívanější povrchovou úpravou, především s použitím olovnaté pájky. Po zákazu používání olovnatých pájek se začalo přecházet na jiné povrchové úpravy. Vzhled této povrchové úpravy se vyznačuje lesklým povrchem barvy cínu.

U technologie HAL s olovnatou pájkou, při následném pájení s bezolovnatou pájkou může nastat nežádoucí jev tzv. fillet lifting, při němž dojde ke zvednutí okraje pájeného spoje.

Nevýhodou této povrchové úpravy je především nedostatečná rovinnost vzniklého povrchu, nevhodná pro některé aplikace (tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí od 1  $\mu\text{m}$  do 20  $\mu\text{m}$ ). Dále teplotní stres, způsobený ponořením desky do roztavené pájky, který může způsobit ohnutí desky, tato metoda tedy není vhodná při výrobě tenkých desek (přibližně do 0,4 mm). Tato metoda je také poměrně energeticky náročná, kvůli nutnosti roztavení velkého množství pájky k ponoření desky, a to především u HALu s bezolovnatou pájkou, kde je nutné pájku ohřát až na teplotu o 20 % vyšší. U technologie HAL s olovnatou pájkou jsou špatné ekologické aspekty, olovnatá pájka je ovšem na druhou stranu stabilnější než vrstva cínu. Další nevýhodou je nemožnost kontaktování

vodičů, a nevhodnost použití pro aplikace s velmi malou roztečí, u kterých může po ponoření do pájky dojít ke vzniku zkratů. Výhodou je možnost vícenásobného teplotního cyklu, zajištění velmi dobré pájitelnosti a také dobrá doba skladovatelnosti takto upravených desek (přibližně 12 měsíců). Tato metoda je také finančně méně nákladná než technologie ENIG.



Obr 1.1 Technologie HAL [2]

## 1.2 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)

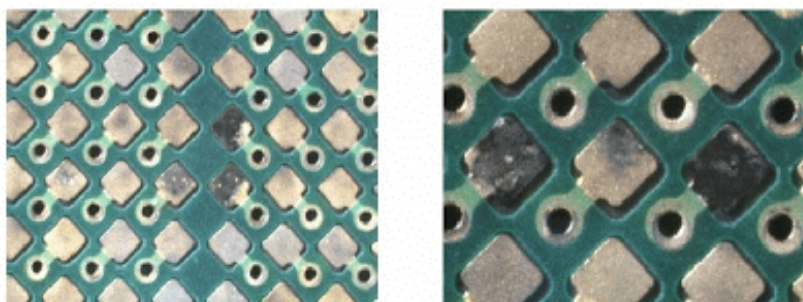
Povrchová úprava ENIG se začala používat v roce 1990, a díky svým výhodám oproti technologii HAL, a větší vhodnosti pro fine pitch aplikace a tenčí desky, se začala rychle uplatňovat na trhu. Vzhledem ke své dlouhé době skladovatelnosti, se ukázala jako velmi multifunkční povrchová úprava.

Jedná se o velmi kvalitní povrchovou úpravu. Zlato je pro povrchové úpravy ideální prvek z toho důvodu, že netvoří oxidy. Desky s touto povrchovou úpravou mají dlouhou dobu skladovatelnosti (až 12 měsíců). Protože se zlato velmi rychle rozpouští do mědi, přidává se mezi vrstvy zlata a mědi ještě vrstva niklu. Samotný nikl ovšem velmi rychle oxiduje, takže by nebyl dostatečnou ochranou, zlato zde tedy plní především ochrannou funkci. Chemicky se zde nanáší vrstva niklu (3-6  $\mu\text{m}$ ) a poté vrstva zlata (minimálně 0,04  $\mu\text{m}$ ). Při nanášení větší vrstvy zlata může dojít ke zhoršení smáčecích charakteristik. Do nanášené vrstvy niklu se také přidávají příměsi fosforu popřípadě bóru, který zvyšuje odolnost proti korozi. Při procesu nanášení se kontroluje úroveň množství těchto příměsí podle specifických procesních limitů. Větší procento příměsí fosforu nebo bóru ovšem může naopak způsobit zhoršení pájitelnosti spoje. Tato metoda se využívá především u náročnějších aplikací. Dále se také využívá při kontaktování hliníkových drátků, popřípadě jako kontaktní povrch. [3]

Výhodou u této metody je již zmiňovaná dlouhá doba skladovatelnosti, velmi dobrá rovinnost povrchu, následná možnost kontaktování, a vhodnost pro fine pitch aplikace. Oproti technologii HAL je zde také eliminován teplotní šok DPS a jsou zde lepší ekologické aspekty. Dalším důvodem použití této metody je teplotní stálost a možnost vícenásobného pájení přetavením, které u většiny ostatních povrchových úprav není možné.

Nevýhodou je vyšší cena výroby (z důvodu použití drahého kovu jako je zlato). Dále difúze zlata do vznikajícího spoje a vytváření intermetalických sloučenin  $AuSn_4$  a  $AuSn_2$ , což způsobuje větší křehkost a menší pevnost spoje. Vzhledem k minimální tloušťce vrstvy zlata je ovšem možnost zkřehnutí pájeného spoje, vlivem příměsí zlata v pájce, zanedbatelná. U této metody je také obtížnější řízení procesu.

Další problém vyskytující se u této povrchové úpravy je tzv. black pad, tedy černá pájecí ploška, kdy dojde k oddělení pájeného spoje od vrstvy niklu, protože intermetalické sloučeniny na rozhraní vrstev nikl-cín jsou křehčí než u rozhraní cín-měď. Vrstva niklu na přechodu pájka/nikl poté má tmavý nebo černý povrch. Důvod tohoto jevu je koroze vrstvy niklu při nanášení vrstvy zlata. Tomuto jevu je možné zabránit dobrou kontrolou procesu, s minimalizací korozní doby ve zlatící lázni. Popřípadě se využívá nanášení vrstvy niklu s příměsí fosforu. [2] [4]



Obr 1.2 Black pad [5]

Při nanášení povrchové úpravy ENIG se využívá dvou typů chemických procesů:

- **Bezprúdový proces – aplikace vrstvy niklu**

Používá se k nanesení vrstvy niklu s příměsí fosforu. Jedná se o chemický proces, při kterém dochází k depozici kovu na povrch pájecích plošek pomocí oxidačně redukčních chemických reakcí, bez použití externího elektrického zdroje. Redukční činidlo, v tomto případě dihydridofosforečnan sodný, reaguje s ionty kovu. Dochází k redukci kovu, a následně k jeho depozici na povrchu desky. Tato reakce je považována za autokatalytickou, neboť k ní bude docházet za přítomnosti zdroje iontů kovu a redukčního činidla dokud nedojde k vyjmutí desky z lázně. Tloušťka nanesené vrstvy tedy závisí na teplotě lázně, chemických parametrech (koncentraci redukčního činidla) a na času stráveném v lázni. [3]

- **Imerzní proces – nanesení vrstvy zlata**

Chemický proces, který využívá substituční reakce pro nanesení kovové vrstvy na vystavený povrch desky. Základní kov dotuje elektrony které redukují pozitivní ionty kovu v roztoku. Díky elektrochemickému potenciálu dochází k nanášení iontů základního kovu na desku kde nahrazují ionty kovu na povrchu, které se tak dostávají do roztoku. Tato reakce se po určitém čase sama zastaví, neboť po pokrytí povrchu zde již nadále není zdroj elektronů. [3]

### 1.3 Imerzní cín (Immersion Tin)

Jedná se o pocínování desky ponorem. Na povrch DPS se chemicky nanáší vrstva cínu tak, že se deska ponoří do kyselé bezproudé cínovací lázně. Existuje více druhů této povrchové úpravy. Například německá firma Ormecon přidává mezi vrstvu cínu a mědi vrstvu organického kovu o tloušťce asi 0,08  $\mu\text{m}$ , která zabraňuje difúzi mezi mědí a cínem, a tedy zabraňuje vzniku intermetalické vrstvy. Další druh této úpravy nabízí firma Atotech, která přidáním anti-whiskerových aditiv snižuje růst cínových whiskerů. Touto technologií vzniká vrstva cínu s velmi dobrou rovinností, o tloušťce kolem 1  $\mu\text{m}$ , která chrání měď před oxidací. Dříve mívala tato povrchová úprava kratší možnou dobu skladovatelnosti, která se pohybovala kolem 3-6 měsíců. K tomu docházelo vlivem migrace mědi do vrstvy cínu, dnešní generace imerzního cínu se s tímto jevem stále potýká, ovšem jsou zde přidány retardanty migrace, které pomáhají dosáhnout velmi dobré doby skladovatelnosti. Dnešní generace imerzního cínu již dosahuje skladovatelnosti 12 měsíců. Vzhled této úpravy se vyznačuje lesklým nebo matným modrošedým povrchem. [6] [7]

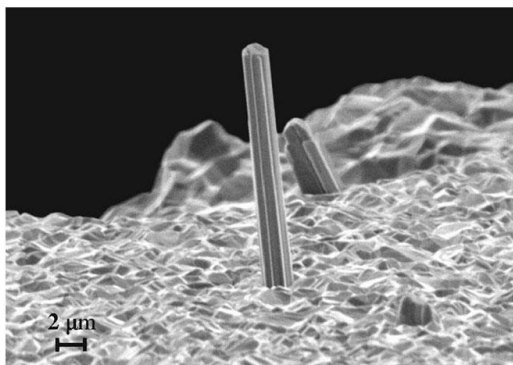
Výhodou této metody je kromě rovinnosti také velmi dobrá materiálová kompatibilita s cínovou pájkou, dobré ekologické aspekty, malá technologická náročnost, nízké náklady na výrobu, výborná rovinnost povrchu a eliminace teplotního šoku.

Nevýhodou této metody je citlivost povrchu na pot a nečistoty, které mohou zhoršovat smáčivost spoje. Je tedy po celou dobu nutná opatrná manipulace v ochranných rukavicích.

V závislosti na teplotě se s časem vytváří na přechodu měď – cín intermetalické sloučeniny  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  a  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ . Pokud vznikne příliš tlustá vrstva těchto sloučenin, může dojít ke zhoršení pájitelnosti takto upravených pájecích plošek, zvyšuje se křehkost pájeného spoje, zmenšuje se jeho pevnost a zhoršují se jeho elektrické vlastnosti. Tyto vrstvy vznikají difúzí částic mědi do cínu a naopak.

Problémem může být také růst cínových whiskerů, což jsou tenká vlákna rostoucí na povrchu cínu a slitin cínu s malým množstvím příměsí. Tato vlákna, o délce většinou menší než 1 mm, rostou velmi pomalu, ale nakonec mohou způsobit zkrat, a tedy poruchu zařízení. Mechanismus růstu whiskerů není stále úplně jasný a je předmětem výzkumu. [4]

Příklad cínového whiskeru můžeme vidět na obrázku 1.1.



Obr 1.3 Cínové whiskery [8]

Při nanášení imerzního cínu se využívá imerzního procesu:

- **Imerzní proces**

Chemický proces, při kterém dochází k chemické substituční reakci. Měděný povrch dotuje roztok elektrony, které redukují pozitivní ionty cínu. Elektrochemický potenciál mezi cínem a mědí způsobuje, že dochází k pokrytí iontů cínu kovu na měděný podklad kde nahrazují ionty cínu původní ionty mědi. Reakce pokračuje dokud jsou nějaké ionty na povrchu, které lze nahradit. Postupně se snižuje porozita cínové vrstvy a snižuje se rychlost reakce. Nakonec se reakce zastaví a vznikne vrstva o konstantní tloušťce. [9]

## 1.4 ENEPIG (Electroless Nickel Electroless Palladium Immersion Gold)

Jedná se o povrchovou úpravu, která se velmi podobá technologii ENIG, pouze je zde přidána mezi nikl a zlato mezivrstva palladia. Tato vrstva tvoří difúzní bariéru mezi niklem a vrstvou zlata. Tloušťka vrstvy niklu se pohybuje v rozmezí od 3 do 6  $\mu\text{m}$ . Vrstva palladia má tloušťku od 0,05 do 0,15  $\mu\text{m}$ . Horní limit 0,15  $\mu\text{m}$  může být překročen u některých speciálních aplikací jako je bondování, kde se nepočítá s pájením. Příliš velká tloušťka vrstvy může způsobovat problémy se spolehlivostí pájených spojů. Tloušťka vrstvy zlata je zde menší oproti ENIGu a měla by být minimálně 0,025  $\mu\text{m}$ . Při tloušťce vrstvy nižší než je tento limit dochází při zrychleném stárnutí ke zhoršení kvality smáčení povrchu. [10]

Výhodou této povrchové úpravy je dlouhá doba skladovatelnosti, která je vyšší než 12 měsíců. Tato povrchová úprava se také používá při bondování zlatých a hliníkových drátků a při kombinaci pájení a bondování na jednom povrchu. Další výhodou je výrazné snížení black padů oproti technologii ENIG. V neposlední řadě je výhodou také nižší cena oproti ENIGu způsobená nižší tloušťkou vrstvy zlata nanášené na povrch. [10]

Používá se také modifikace této metody ENIPIG (Electroless Nickel Immersion Palladium Immersion Gold), rozdíl je ve způsobu nanášení vrstvy palladia, ke kterému se zde využívá imerzního procesu. Oproti bezproudému procesu je zde výhoda lepší kontroly procesu, jelikož se zde reakce nakonec sama zastaví. U bezproudého nanášení palladia je také náročnější údržba lázně vzhledem k požadavkům na redukční činidlo. Smáčecí zkoušky vykazují výbornou smáčivost s výsledky srovnatelnými s povrchovými úpravami ENIG a ENEPIG. [11]

## 2 PÁJECÍ SLITINY

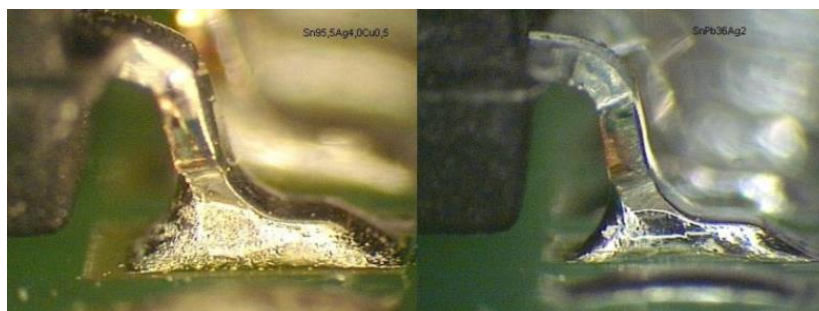
Pájecí slitina je základní součást pájeného spoje. Při výběru typu pájecí slitiny se pozornost věnuje především jejím mechanickým a elektrickým vlastnostem, materiálové kompatibilitě s použitými materiály, způsobu pájení, toxicitě (hlavně obsahu olova v pájce) a ceně pájecí slitiny. Základním kritériem pro vznik kvalitního pájeného spoje je vznik difúzní vrstvy na rozhraní cínu a mědi, kde vznikají intermetalické sloučeniny.

Pájka musí především zajišťovat:

- Mechanickou fixaci součástky
- Elektrické propojení
- Odvod ztrátového tepla
- Ochranu před oxidací

Dříve se používaly pájky složené především ze směsi cínu a olova. Od 1. 7. 2006 je v zemích EU zákaz používání pájek s obsahem olova. Důvodem je toxicita olova v pájce. Dnes se proto ve většině aplikací až na povolené výjimky používají pájky bez obsahu olova. [1]

Bezolovnaté pájky mají sice lepší ekologické aspekty, ale jejich mechanické a elektrické vlastnosti nedosahují kvality olovnatých pájek. Tyto pájky jsou především křehčí a většinou mají také vyšší teplotu tavení. Zatímco eutektická olovnatá pájka SnPb má teplotu tání 183 °C, tak teploty tavení většiny bezolovnatých pájek se pohybují v rozmezí od 195 °C do 227 °C. Je tedy potřeba použití více energie k roztavení těchto slitin. Vyšší teplota pájení ovšem může mít negativní účinky na výsledný pájený spoj, kde může narůst příliš velká vrstva intermetalických sloučenin. Ohled se také musí brát na teplotní odolnost pájených součástek, které by mohly být poškozeny. Dále vykazují bezolovnaté pájky horší smáčecí charakteristiky. Bezolovnaté pájky jsou taktéž ve většině případů dražší, protože bez olova se musí její vlastnosti vylepšovat jinými prvky, jako jsou stříbro, nikl, měď, bismut, antimon a další. Tyto prvky sice zlepšují určité vlastnosti pájky, ale zároveň mohou zvýšit také její cenu nebo teplotu tavení. Většinu objemu pájky ovšem stále tvoří cín. [4]



Obr 2.1 Srovnání spoje s pájkou SAC305(vlevo) a SnPb36Ag2 [1]

Nejpoužívanějšími bezolovnatými pájecími slitinami jsou v dnešní době pájky SAC305 a SN100C. Naopak nejpoužívanější olovnatou pájkou je v současnosti pájka Sn63Pb37. Rozdíl ve vzhledu mezi olovnatou a bezolovnatou pájkou můžeme vidět na obrázku 2.1. [1]

## **2.1 Sn63Pb37**

Jde v současné době o nejpoužívanější olovnatou pájku. Tato pájka se skládá z 63 % cínu a 37 % olova. Teplota tání této pájecí slitiny je 183 °C. Nízká teplota tavení je jednou z hlavních výhod a důvodů použití této pájky. Mezi další výhody této pájky patří velmi dobrá tekutost. Výsledný spoj je hladký a lesklý, navíc tato pájka vykazuje velmi dobré smáčecí charakteristiky. Mezi výhody této pájky lze zařadit také nízká cena.

## **2.2 SAC305**

SAC305 je v současnosti nejpoužívanější bezolovnatá pájka. Jedná se o pájku složenou z 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi, kde měď a stříbro především zvyšují pevnost spoje. Tato pájka se vlastnostmi asi nejvíce blíží olovnaté pájce Sn63Pb37. Dosahuje velmi dobrých mechanických vlastností a spolehlivosti pájeného spoje. Také má přijatelnou teplotu tavení, konkrétně 217 °C, tedy o 34 °C vyšší než olovnatá pájka Sn63Pb37. Pájka SAC305 vykazuje mírně horší smáčecí charakteristiky především vlivem většího povrchového napětí. Tato pájka také působí poměrně erozivně na většinu pájených povrchů. Na rozdíl od olovnaté pájky má spoj s pájkou SAC305 matnější a drsnější povrch. Nevýhodou je vyšší cena, způsobená přítomností stříbra v pájce.

## **2.3 SN100C**

Jedná se o druhou nejpoužívanější bezolovnatou pájku. Pájka je složena z 0,7 % mědi, 0,05 % niklu a 0,005 % germánia, zbytek pájky je tvořen cínem. Výhodou této pájky je její vyšší tekutost, která je srovnatelná s olovnatou pájkou Sn63Pb37, olovnaté pájce se podobá i svým vzhledem. Oproti pájce SAC305 je výhodou, vzhledem k absenci stříbra, nižší cena. Tato pájka také vykazuje lepší smáčecí charakteristiky. Naopak nevýhodou je vyšší teplota tavení, která je 227 °C, tedy o 44 °C vyšší, než u olovnaté pájky. Oproti pájce SAC305 vykazuje pájecí slitina SN100C lepší smáčecí charakteristiky i nižší erozi mědi a nerezi.



### 3 PÁJITELNOST

Pájení je důležitá součást výroby plošných spojů. Jde o tepelné spojení kovů pomocí roztavené pájecí slitiny. Na rozdíl od sváření zde tedy nedochází k roztavení spojovaných částí, ale je přidána pájka, která slouží jako spojovací materiál. Pro kvalitní pájený spoj musí pájené materiály vykazovat dobrou pájitelnost, což je vlastnost určující vhodnost materiálu k pájení. Pájitelnost je různá pro každý druh kovu, jelikož každý kov má jinou schopnost vytvářet intermetalické sloučeniny, což je základní podmínkou pro vznik kvalitního spoje.

Pájitelnost materiálu, se může měnit v závislosti na stárnutí materiálu, úrovni koroze a může být ovlivněna i špatným skladováním. Také se zhoršuje s úrovní oxidace daného kovu. Dnes se tedy zavádí pájení s využitím ochranné inertní atmosféry tvořené dusíkem pro zabránění oxidaci.

Pájitelnost se hodnotí z hlediska tří aspektů [1]:

- Smáčivost
- Umožnění ohřevu plochy na požadovanou teplotu
- Odolnost vůči teplotě při pájení

Smáčivost je jedním z hledisek pájitelnosti a je to základní požadavek pro vytvoření kvalitního spoje. Dobrá smáčivost povrchu zajistí dobré roztečení pájky po celé ploše pájecí plošky.

Pájka se po svém roztavení chová jako kapalina. Na její povrch tedy působí povrchové napětí, které způsobuje, že se povrch pájky snaží mít co nejmenší plochu, a tedy se snaží dosáhnout kulovitěho tvaru. Dále na pájku působí adhezivní síly, které ji nutí rozšířit styčnou plochu mezi pájkou a substrátem. Pokud je povrchové napětí pájky větší než adhezivní síly, dochází k tvorbě kuliček pájky na desce, a tedy nevzniká kvalitní pájený spoj. Pokud jsou adhezivní síly větší než povrchové napětí, dochází ke smáčení povrchu, a roztečení pájky. Pájka se roztéká po povrchu, dokud nejsou tyto dvě síly v rovnováze.

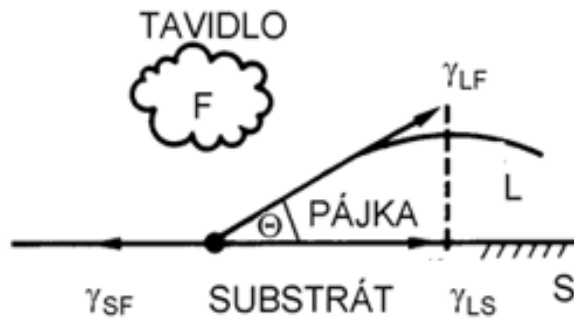
Smáčivost je dána tzv. smáčecím úhlem  $\theta$ . Podle velikosti smáčecího úhlu určujeme úroveň smáčení. Ideální stav nastává, pokud je smáčecí úhel roven nule, mluvíme o ideálním smáčení. Pokud je smáčecí úhel v rozmezí  $20^\circ$ - $90^\circ$ , mluvíme o smáčení a pokud je úhel větší než  $90^\circ$ , jde o nesmáčení. [12]

Platí podmínka rovnováhy na rozhraní tří fází, viz. obrázek 3.1, kterou popisuje Youngova rovnice:

$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} + \gamma_{LF} \cdot \cos\theta, \quad (3.1)$$

kde  $\gamma_{SF}$  je povrchové napětí na rozhraní substrát-tavidlo,  $\gamma_{LS}$  je povrchové napětí na

rozhraní pájka-substrát,  $\gamma_{LF}$  je povrchové napětí na rozhraní pájka-tavidlo a  $\theta$  je smáčecí úhel. Povrchové napětí se udává v jednotkách  $\text{Nm}^{-1}$  a smáčecí úhel ve stupních.



Obr 3.1 Smáčení povrchu pájkou [2]

Z rovnice je patrné, že povrchové napětí na jednotlivých rozhraních je základní kritérium pro dobrou smáčivost povrchu. V praxi se snažíme docílit co nejmenšího povrchového napětí na rozhraní tavidlo-pájka a pájka-substrát a co největšího povrchového napětí na rozhraní tavidlo-substrát, tím se zmenší smáčecí úhel, a tedy selepší smáčivost. V rovnici ovšem není zahrnut vliv gravitační síly a reakce mezi pájkou a substrátem.

Smáčivost dále závisí na druhu použité pájky, jejích vlastnostech, na naneseném tavidle, na povrchové úpravě desky vývodů součástky, a také na případné úrovni oxidace povrchu. Zlepšení smáčivosti může také přispět použitá pájecí atmosféra tvořená dusíkem nebo redukčním plynem. Dále musí mít pájka odpovídající pracovní teplotu, aby došlo k jejímu správnému roztečení po desce. Důležitým faktorem je také obsah nečistot v pájeném spoji, míra oxidace povrchu a jeho drsnost. Pro lepší smáčivost se používá zvýšení teploty pájení, zvětšení aktivity tavidla nebo pájení v ochranné atmosféře, přičemž teplota pájení je omezena použitým materiálem, případně tepelnou odolností součástek. Navíc při vyšší teplotě dochází k větší míře oxidace. [4]

## 4 POVRCHOVÉ ÚPRAVY A ENVIROMENTÁLNÍ VLIVY

Stárnutí materiálu je způsobeno především oxidací povrchu a vznikem příliš tlustých vrstev intermetalických sloučenin na rozhraní dvou materiálů. Pro vznik kvalitního pájeného spoje je vrstva intermetalických sloučenin nezbytná. S postupujícím časem, v závislosti na teplotě, tyto vrstvy narůstají, čímž se zhoršuje kvalita spoje, zvyšuje se jeho křehkost a zmenšuje pevnost. Dále se zhoršují jeho elektrické vlastnosti, snižuje životnost a zhoršuje se smáčivost povrchu. Tyto intermetalické vrstvy vznikají difúzí mezi dvěma materiály, kde se vytváří chemické a fyzikální vazby. Tloušťka intermetalické vrstvy závisí na teplotě, při vyšší teplotě se její růst urychluje. Za normálních okolností se tloušťka těchto vrstev pohybuje v řádu jednotek mikrometrů. V případě tlustších vrstev se mohou vytvořit praskliny a spoj může ztrácet své mechanické a elektrické vlastnosti.

Difúze začíná ve chvíli, kdy dojde ke smáčení povrchu. Její rychlost a tloušťka vytvořené vrstvy závisí na materiálech spojovaných komponentů a na teplotě.

U povrchových úprav DPS se stárnutí projevuje především u HALu a u úpravy imerzním cínem. Zde vznikají na rozhraní mědi a cínu intermetalické sloučeniny  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  a  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , a také zde dochází ke vzniku oxidů na povrchu. U povrchové úpravy ENIG je vzniku vrstvy intermetalických sloučenin zlata a mědi zabráněno mezivrstvou niklu.

Proces stárnutí se dá urychlit pomocí tzv. izotermálního stárnutí, kdy je materiál vystaven po určitou dobu zvýšené konstantní teplotě, což značně urychluje vznik intermetalických sloučenin a zvyšuje rychlost oxidace. [4]

### 4.1 Oxidace povrchu

Během stárnutí materiálu dochází na povrchu k tvorbě vrstvy oxidů. Následkem nárůstu vrstvy oxidů může dojít ke zhoršení smáčivosti povrchu. Při pájení by měla být tato vrstva odstraněna pomocí tavidla, které by mělo zabránit i následné reoxidaci. V případě, že je ale vrstva oxidů příliš tlustá, je možné, že ji tavidlo nedokáže odstranit. Nejvíce se oxidace projevuje na povrchu čisté mědi, pokud je povrch pokrytý cínem nebo pájkou je oxidace méně výrazná.

V problematice pájení je oxidace problematická především u mědi a cínu. Jedná se o proces, kdy u určitého prvku dojde ke ztrátě elektronu, a tedy ke zvýšení oxidačního čísla, které udává součet pozitivních a negativních nábojů v atomu. Kyslík je oxidační činidlo, což znamená, že velmi lehce přijímá elektrony.

V případě plošných spojů se to projeví především ve chvíli kdy měděná pájecí ploška je vystavena kontaktu s kyslíkem nebo sloučeninami kyslíku (např. vlhkosti), tedy na ni není nanесena žádná povrchová úprava, která by tomu bránila. Začne zde docházet k vytváření oxidů měďného ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) a měďnatého ( $\text{CuO}$ ). Jakmile dojde k nárůstu vrstvy oxidů, začne tato vrstva bránit dalšímu pronikání kyslíku k mědi. Tento stav se dá v některých odvětvích využít, ale v rámci pájení je vznik oxidů nežádoucí. Smáčivost povrchu se prudce zhoršuje.

U povrchových úprav se projeví především oxidace cínu, kde vznikají při kontaktu s kyslíkem oxid cínatý ( $\text{SnO}$ ) a ciničitý ( $\text{SnO}_2$ ). Problémem těchto oxidů je vyšší teplota tání, což způsobí problémy při snaze o zapájení příslušné pájecí plošky. Reakce probíhá dle následujících rovnic 4.1 a 4.2. [14]



V rámci povrchových úprav je na oxidaci povrchu nejnáchylnější imerzní cín, nejméně se oxidace naopak projevuje u technologie ENIG, zde je oxidaci zabráněno nanесením tenké vrstvy zlata na povrch niklu, který tvoří chemicky nanесenou mezivrstvu na měďný povrch, jenž brání difúzi mezi mědí a zlatem.

## 4.2 Vliv vlhkosti na povrchové úpravy

Pokud je materiál vystaven zvýšené vlhkosti, zvyšuje se i rychlost oxidace. Může zde dojít především k elektrochemické korozi materiálu, což je proces, při kterém dochází k rozrušování materiálu. U mědi vystavené kontaktu s vodními parami dochází k oxidaci, kdy na povrchu vzniká tenká vrstva uhličitanu měďnatého. Aby se tomuto jevu zabránilo, nanесou se na měď povrchové úpravy, které jsou vůči působení vnějších vlivů odolnější.

Z povrchových úprav je náchylnější vůči vlhkosti imerzní cín. Například firma Gatema uvádí jako skladovací podmínky pro imerzní cín relativní vlhkost menší než 50 %. Povrchová úprava ENIG je opět díky ochranné vrstvě zlata na povrchu vůči vlivu vlhkosti velmi odolná.

## 4.3 Vliv teploty na růst intermetalické vrstvy

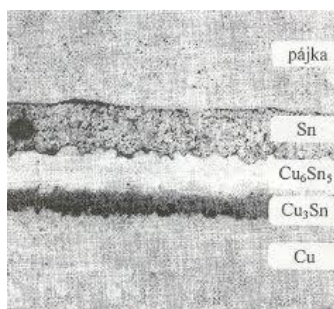
Pájený spoj vzniká difúzí částic pájky do materiálu, DPS a součástek, čímž vznikne difúzní vrstva na rozhraní pájka-pájecí ploška, kde vznikají intermetalické sloučeniny, zde jsou to většinou intermetalické sloučeniny  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  a  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ . Tato vrstva je nezbytná pro vznik kvalitního pájeného spoje. Pokud ovšem intermetalická vrstva nabude příliš velké tloušťky, může negativně ovlivnit vlastnosti pájeného spoje, především jeho

pevnost a křehkost. Dále také může ovlivnit jeho elektrické vlastnosti, jako je zvýšený odpor. V konečném důsledku může vést až k nefunkčnosti pájeného spoje. Rychlost růstu intermetalických sloučenin v závislosti na teplotě se dá popsat pomocí rovnice 4.3. [13]

$$w(t) = w_0 + A \cdot t^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (4.3)$$

kde  $w(t)$  vyjadřuje tloušťku intermetalických sloučenin po čase  $t$  v  $\mu\text{m}$ ,  $w_0$  je počáteční tloušťka intermetalické vrstvy v  $\mu\text{m}$ ,  $A$  je konstanta v  $\text{ms}^{-1}$ ,  $n$  představuje časový exponent rychlosti růstu (v případě rozhraní SAC pájka/měď a SAC pájka/ Sn povlak  $n=0,5$ ),  $Q$  je aktivační energie pro růst intermetalické vrstvy v  $\text{Jmol}^{-1}$ ,  $R$  vyjadřuje univerzální plynovou konstantu  $8,314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$  a  $T$  představuje teplotu stárnutí v  $\text{K}$ .

Na obrázku 4.1 můžeme vidět příklad vzniku intermetalických sloučenin na přechodu měď-cín, konkrétně zde vznikají sloučeniny  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  a  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ .



Obr 4.1 Intermetalické vrstvy při pájení [15]

Vznik příliš velké vrstvy těchto sloučenin je způsoben především příliš vysokou teplotou při pájení, příliš dlouhou dobou pájení a tepelným namáháním při provozu. Tloušťku vrstvy také ovlivňuje použitý materiál pájky a materiál pájecí plošky, případně vývodu součástky. Intermetalické vrstvy rostou i dále při normální provozní teplotě, ale velmi pomalu, pokud je vrstva pájky velmi tenká, může se stát, že je zcela nahrazena vrstvou intermetalických sloučenin.

## 4.4 Zrychlené zkoušky

Při zrychlených zkouškách jsou sledované vzorky vystaveny vyššímu namáhání, než by byly za normálních podmínek. Může se jednat o zkoušky při zvýšené teplotě, případně zvýšené vlhkosti, nebo může jít o kombinaci těchto vlivů. Podmínky jsou při zkouškách buď konstantní po celou dobu testování, nebo se mění cyklicky. Tyto zkoušky simulují nesprávné zacházení s testovanými vzorky. V případě vzorků povrchových úprav simulují především špatné podmínky skladování, u nichž je většinou určena doporučená teplota a relativní vlhkost. Popřípadě může jít o simulaci delší doby skladování, nebo například vystavení různým náročnějším procesům, jako je několikanásobné přetavení.

# 5 METODIKA MĚŘENÍ

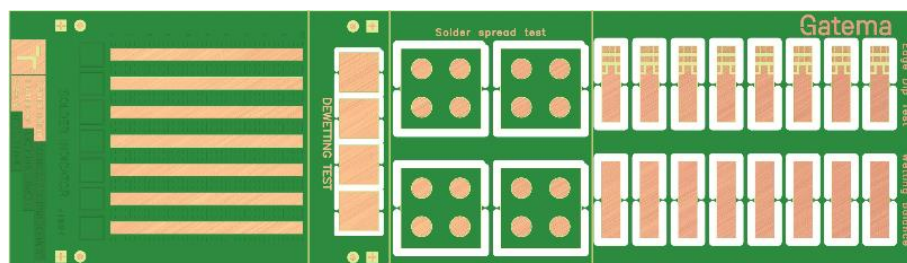
## 5.1 Testovací kupón

Testovací kupón pro měření kvality povrchových úprav DPS byl navržen firmou Gatema Boskovice ve spolupráci s FEKT VUT Ústavem elektrotechnologie, přičemž vychází z podobného testovacího kupónu používaného firmou Atotech. Používají se kupóny s povrchovými úpravami imerzní cín a ENIG. Tento kupón se skládá z pěti částí, kde každá je určená pro jistou metodu testování kvality povrchových úprav. Dílčí metody simulují jak pájení přetavením, tak pájení vlnou.

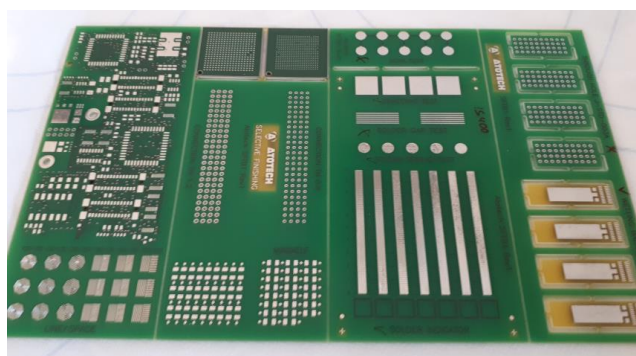
Jednotlivé testy jsou:

- Wetting balance test (zkouška metodou smáčecích vah)
- Edge dip test (zkouška ponorem)
- Solder indicator (indikátor roztečení pájky)
- Solder spread test (zkouška na roztečení pájky)
- Dewetting test (zkouška na odsmáčení)

Tyto testovací metody jsou blíže popsány v dalších kapitolách. Samotný testovací kupón je zobrazen na obrázku 5.1. Původní testovací kupón firmy Atotech je poté na obrázku 5.2.



Obr 5.1 Testovací kupón s povrchovou úpravou ENIG [16]

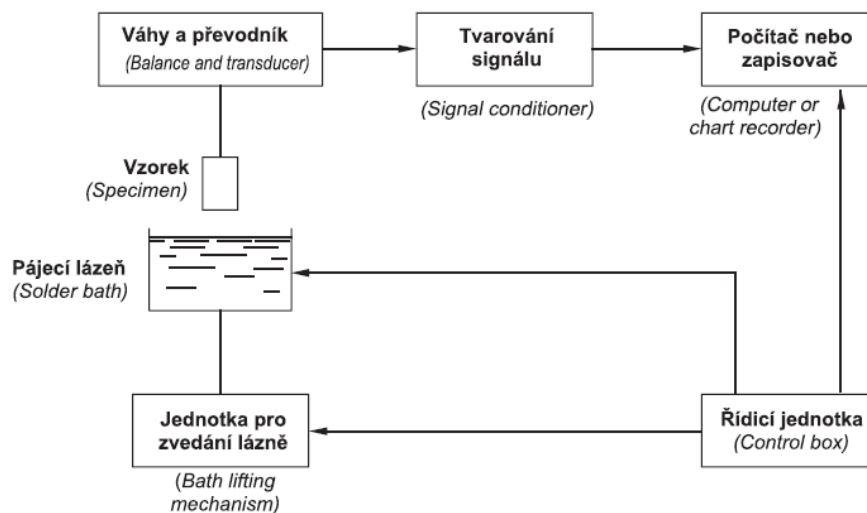


Obr 5.2 Původní testovací kupón firmy Atotech

## 5.2 Wetting balance test

Na testovacím kupónu je tato metoda označena anglickým názvem Wetting balance test. Je zde 8 vzorků o rozměrech 5 mm x 10 mm x 1 mm.

Metoda smáčecích vah slouží k měření smáčecích charakteristik vývodů součástek, či substrátu. Tato metoda se používá především pro vývodové součástky, ale je možné ji použít i pro SMD součástky. Při této metodě měření se vzorek s naneseným tavidlem ponoří do lázně s roztavenou pájkou. Nádoba s roztavenou pájkou leží na zdvihacím mechanismu. Při měření se tedy zvedá tato nádoba, dokud se vzorek neponoří do pájky. Jedná se o velmi přesnou metodu, při které je vzorek zavěšen na velmi citlivých mikrováhách, které měří síly působící na měřený vzorek. Tomuto zařízení se říká meniskograf, jeho schéma můžeme vidět na obrázku 5.3. Nevýhodou této metody je skutečnost, že meniskograf je velmi drahé zařízení a pro většinu firem tedy není finančně dostupné.



Obr 5.3 Schéma meniskografu [17]

Pomocí meniskografu se dá nastavovat rychlost ponoru, hloubka ponoru, prodleva vzorku v lázni a teplota lázně.

Testování probíhá tak, že se na vzorek nanese tavidlo, odstraní se přebytek tavidla, a poté se zavěsí na siloměr. Ze začátku na vzorek žádná smáčecí síla nepůsobí. Smáčecí síla začíná působit při styku s pájkou. Pokud se vzorek ponoří do pájky dostatečně rychle, tak se nesmočí, případně se smočí jen velmi málo, a výsledky testu tak nejsou ovlivněny před plným ponořením. Při ponoření by měl vzorek svírat s rovinou pájky úhel 90°. Během ponoření začne na vzorek působit povrchové napětí a Archimédova vztlačková síla, které vytlačují vzorek ven z pájky. Po ponoření pájka stoupá po povrchu vzorku, dokud opět nevytvoří rovnou hladinu. Jakmile se začne vzorek smáčet, otočí se směr působení

povrchového napětí, které začne vzorek stahovat do pájky. Pájka poté vystoupá do určité výšky, dané smáčivostí vzorku. Tato výška závisí i na povrchovém napětí. [18]

Tato metoda měří výslednici sil působící na vzorek. Tyto síly můžeme vyjádřit pomocí rovnice 5.1:

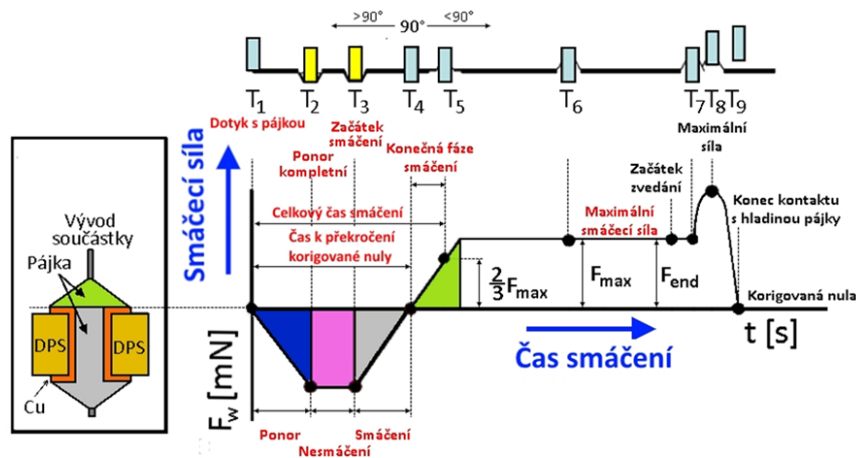
$$F = \gamma p \cos\theta - g\rho V \quad (5.1)$$

kde  $F$  vyjadřuje rovnovážnou smáčecí sílu v N,  $\gamma$  je povrchové napětí pájky v  $\text{Nm}^{-1}$ ,  $p$  je obvod vzorku v m,  $\theta$  je smáčecí úhel ve stupních,  $g$  je gravitační zrychlení v  $\text{ms}^{-2}$ ,  $\rho$  je hustota pájky v  $\text{kgm}^{-3}$  a  $V$  představuje objem ponořené části vzorku v  $\text{m}^3$ .

Hodnoty  $g\rho V$  vyjadřují Archimédovu vztlakovou sílu, tedy jsou určeny objemem ponořené části vzorku do roztavené pájky, která vzorek vytlačuje ven z pájky. Část pravé strany rovnice před znaménkem mínus vyjadřuje sílu smáčecí. V této rovnici se mění během měření pouze hodnota smáčecího úhlu. Největší hodnoty tedy dosáhne smáčecí síla, pokud je smáčecí úhel roven  $0^\circ$ .

### 5.2.1 Smáčecí charakteristiky

Na obrázku 5.4 vidíme smáčecí charakteristiku vzorku měřeného metodou smáčecích vah.

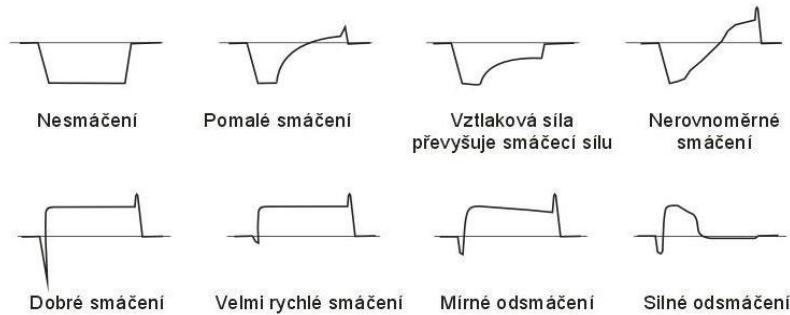


Obr 5.4 Průběh měření metodou smáčecích vah [19]

V bodě T1 dochází k prvnímu styku vzorku s roztavenou pájkou. V bodě T2 dochází k úplnému ponoření vzorku do pájky. Postupně se začíná vzorek smáčct, což vidíme v bodě T3, kde začíná smáčecí síla působit opačným směrem než doposud. Poté v bodě T4 se hladina pájky vyrovnává a v bodě T5 pájka začíná po vzorku vzlínat vzhůru. V bodě T4 se síla smáčecí a síla vztaková vyrovnávají. V bodě T6 dosahuje smáčecí síla svého maxima a smáčecí úhel svého minima a blíží se nule. Bod T7 představuje začátek vytahování vzorku z pájky, v bodě T8 působí na vzorek maximální síla. V bodě T9 poté



dochází k úplnému vytažení vzorku z pájky, dále už je jen výsledný stav. Za maximem v bodě T6 by velikost působící síly měla zůstat konstantní, může ovšem dojít k odsmáčení, což způsobí, že bude křivka klesat.



Obr 5.5 Různé průběhy smáčení [20]

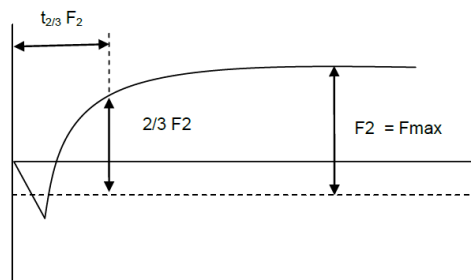
Různé druhy smáčecích charakteristik jsou zobrazeny na obrázku 5.5.

Abychom získali hodnoty smáčecí síly, provádí se korekce nulové osy. To se provádí tak, že se spočítá vztlaková síla z rovnice 5.2:

$$F_{vz} = \rho g V \quad (5.2)$$

kde  $F$  představuje vztlakovou sílu v N,  $\rho$  udává hustotu pájky v  $\text{kgm}^{-3}$ ,  $g$  je gravitační zrychlení v  $\text{ms}^{-2}$  a  $V$  je objem ponořeného vzorku v  $\text{m}^3$ .

Hodnotu získanou z této rovnice odečteme od nulové osy, čímž získáme novou korigovanou osu, které se říká korigovaná nula. Tato korigovaná osa se bude nacházet pod nulovou osou přístroje. Od této osy se poté měří všechny doby smáčení a smáčecí síly. Především jde o hodnotu maximální smáčecí síly, ze které se dopočítá hodnota odpovídající 2/3 této síly označené jako  $F_{2/3}$ , a zjistí se čas, při kterém je dosaženo této síly, tento čas se značí  $t_{2/3}$ . Tyto síly můžeme vidět vyznačené na obrázku 5.6. Výsledky se poté vyhodnocují podle poměru těchto dvou hodnot, tedy  $F_2/t_{2/3}$ . Tento poměr by měl být co největší. Tedy síla  $F_{2/3}$  by měla být dosažena v co nejkratším čase. Z tohoto poměru se tedy nakonec určuje smáčivost materiálu. [4]



Obr 5.6 Síla  $F_{2/3}$  v čase  $t_{2/3}$  [13]

## 5.2.2 Vyhodnocení metody podle normy

Vyhodnocením metody smáčecích vah se zabývá norma IPC J-STD-003C. V této normě jsou uvedeny kritéria, která by měla být splněna, aby testovaný vzorek prošel testem. Hodnoty jsou uvedeny pro povrchové úpravy imerzním cínem, a úpravu ENEPIG, kde je oproti technologii ENIG přidána ještě vrstva palladia. Pro ostatní povrchové úpravy je zde uvedena další tabulka, která rozděluje hodnocení výsledků do dvou tříd lišících se svou přísností. V normě se počítá s použitím eutektické pájky Sn63Pb37 nebo pájky SAC305.

Podmínky, které by měly být splněny [21]:

- Na všech testovaných ploškách by mělo dojít ke smáčení.
- Plocha testovaného vzorku pokrytá pájkou by měla být větší, než byla plocha ponořená do pájky.
- Nemělo by dojít k viditelnému odsmáčení většímu než 5%.

Kromě výše uvedených kritérií norma udává i některé časy a minimální velikosti smáčecích sil během zkoušky. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1. Hodnoty jsou uvedeny pro zkoušku s použitím pájky SAC305, hodnoty pro eutektickou pájku Sn63Pb37 jsou uvedeny v tabulce 5.2.

Podmínky prováděné zkoušky v pájce SAC305:

- Teplota pájky: 255 °C
- Ponor: 1 - 5 mm
- Prodleva v lázni:  $10 \pm 0,5$  s
- Rychlost ponoru: 10 mm·s<sup>-1</sup>

Tab 5.1 Doporučené hodnoty pro zkoušky při použití pájky SAC305 [21]

| Parametr                   | Popis                                           | Navržená kritéria                       |                                         |
|----------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
|                            |                                                 | ENEPIG                                  | Imerzní cín                             |
| T <sub>0</sub> po dodání   | Čas do dosažení korigované nuly                 | ≤1,5 s                                  | ≤2 s                                    |
| T <sub>0</sub> po stárnutí | Čas do dosažení korigované nuly                 | ≤2,5 s                                  | ≤3 s                                    |
| F2                         | Smáčecí síla po dvou sekundách od začátku testu | ≥25 % maximální teoretické smáčecí síly | ≥25 % maximální teoretické smáčecí síly |
| F5                         | Smáčecí síla po pěti sekundách od začátku testu | Stejná nebo vyšší než F2                | Stejná nebo vyšší než F2                |
| Minimální síla po dodání   | Po 10 sekundách                                 | >0,19 mN/mm                             | >0,15 mN/mm                             |
| Minimální síla po stárnutí | Po 10 sekundách                                 | >0,17 mN/mm                             | >0,12 mN/mm                             |

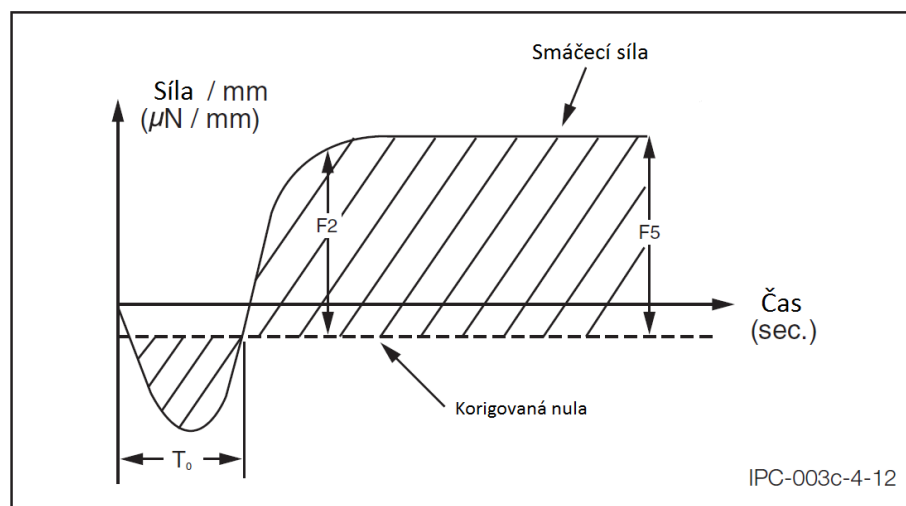
Podmínky provádění zkoušky v pájce Sn63Pb37:

- Teplota pájky: 235 °C
- Ponor: 1 - 5 mm
- Prodleva v lázni:  $10 \pm 0,5$  s
- Rychlost ponoru:  $10 \text{ mms}^{-1}$

Tab 5.2 Doporučené hodnoty pro zkoušky při použití pájky Sn63Pb37 [21]

| Parametr                   | Popis                                           | Navržená kritéria                             |                                               |
|----------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                            |                                                 | ENEPIG                                        | Imerzní cín                                   |
| $T_0$ po dodání            | Čas do dosažení korigované nuly                 | $\leq 2$ s                                    | $\leq 2$ s                                    |
| $T_0$ po stárnutí          | Čas do dosažení korigované nuly                 | $\leq 3$ s                                    | $\leq 3$ s                                    |
| F2                         | Smáčecí síla po dvou sekundách od začátku testu | $\geq 25$ % maximální teoretické smáčecí síly | $\geq 25$ % maximální teoretické smáčecí síly |
| F5                         | Smáčecí síla po pěti sekundách od začátku testu | Stejná nebo vyšší než F2                      | Stejná nebo vyšší než F2                      |
| Minimální síla po dodání   | Po 10 sekundách                                 | $>0,15$ mN/mm                                 | $>0,14$ mN/mm                                 |
| Minimální síla po stárnutí | Po 10 sekundách                                 | $>0,12$ mN/mm                                 | $>0,10$ mN/mm                                 |

Jednotlivé časy a smáčecí síly uvedené v tabulce 5.1, 5.2 jsou dále vyznačeny na smáčecí křivce na obrázku 5.7.



Obr 5.7 Smáčecí křivka [21]

Tab 5.3 Doporučené hodnoty pro ostatní povrchové úpravy [21]

| Parametr       | Popis                                           | Navržená kritéria                       |                          |
|----------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|
|                |                                                 | Třída 1                                 | Třída 2                  |
| T <sub>0</sub> | Čas do dosažení korigované nuly                 | ≤1 s                                    | ≤2 s                     |
| F2             | Smáčecí síla po dvou sekundách od začátku testu | ≥25 % maximální teoretické smáčecí síly | Pozitivní hodnota        |
| F5             | Smáčecí síla po pěti sekundách od začátku testu | Stejná nebo vyšší než F2                | Stejná nebo vyšší než F2 |

Teoretická maximální smáčecí síla se počítá podle rovnic 5.3 a 5.4 podle normy IPC J-STD 003C, je zde započítán vliv nesmáčivých stran vzorku.

$$V = (p - 2c) \cdot c \cdot a \quad (5.3)$$

$$F_{teor} = \gamma \rho \cos \theta \quad (5.4)$$

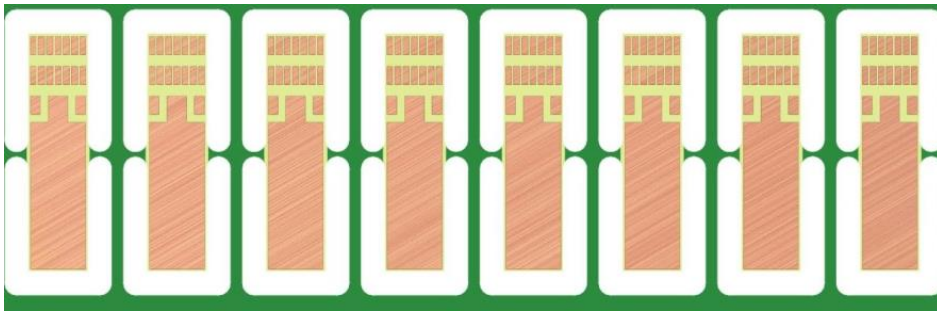
kde  $p$  je smáčivý obvod vzorku  $v$ ,  $c$  je tloušťka vzorku, sledovaná veličina  $a$  je hloubka ponoru. Všechny hodnoty jsou v milimetrech.  $F_{teor}$  vyjadřuje maximální teoretickou smáčecí sílu v mN,  $\gamma$  je povrchové napětí roztavené pájky v mN/mm,  $\rho$  je hustota pájky,  $g$  představuje gravitační zrychlení v mm/s<sup>2</sup>. Smáčecí úhel je pro maximální hodnotu roven nule.

### 5.3 Edge dip test

Tento test se podobá metodě smáčecích vah. Používají se vzorky o stejných rozměrech (5 mm x 10 mm x 1 mm), avšak rozdíl je v tom, že měď není nanesena na celou plochu vzorku ale povrch je rozdělen na několik menších padů. Na testovacím kupónu je vždy 8 vzorků pro tuto metodu

Provedení tohoto testu probíhá na meniskografu, ale nejsou sledovány smáčecí charakteristiky. Vzorky se uchytí do držáků meniskografu tak, aby část kde jsou samostatné pájecí plošky směřoval do pájky. Hloubka ponoru se nastaví tak, aby se všechny pady potopily do pájky. Na tuto část vzorku se poté nanese tavidlo, a vzorek se ponoří do pájky. Čas ponoru by měl být  $10 \pm 0,5$  s.

Testovací vzorky pro edge dip test jsou zobrazeny na obrázku 5.8.

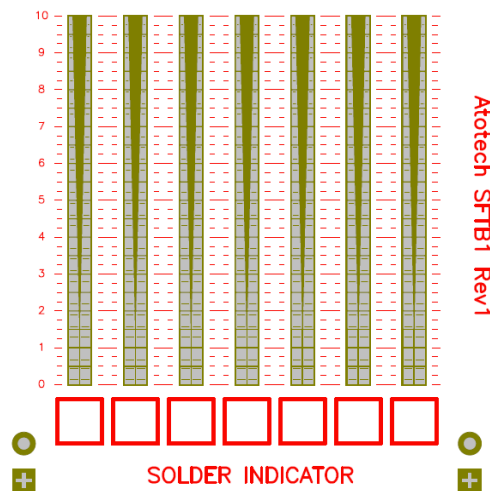


Obr 5.8 Vzorky pro edge dip test

Test a jeho vyhodnocení popisuje norma IPC J-STD-003C. Vyhodnocení testu probíhá pouze vizuální kontrolou, pod optickým mikroskopem. Kontroluje se, aby alespoň 95% pájecích plošek, které byly ponořeny do pájky, vykazovaly dobré smáčení. Všechny by měly být pokryty pájkou. Na pájecích ploškách by nemělo dojít k žádnému odsmáčení nebo k odhalení měděného podkladu.

## 5.4 Metoda solder indicator

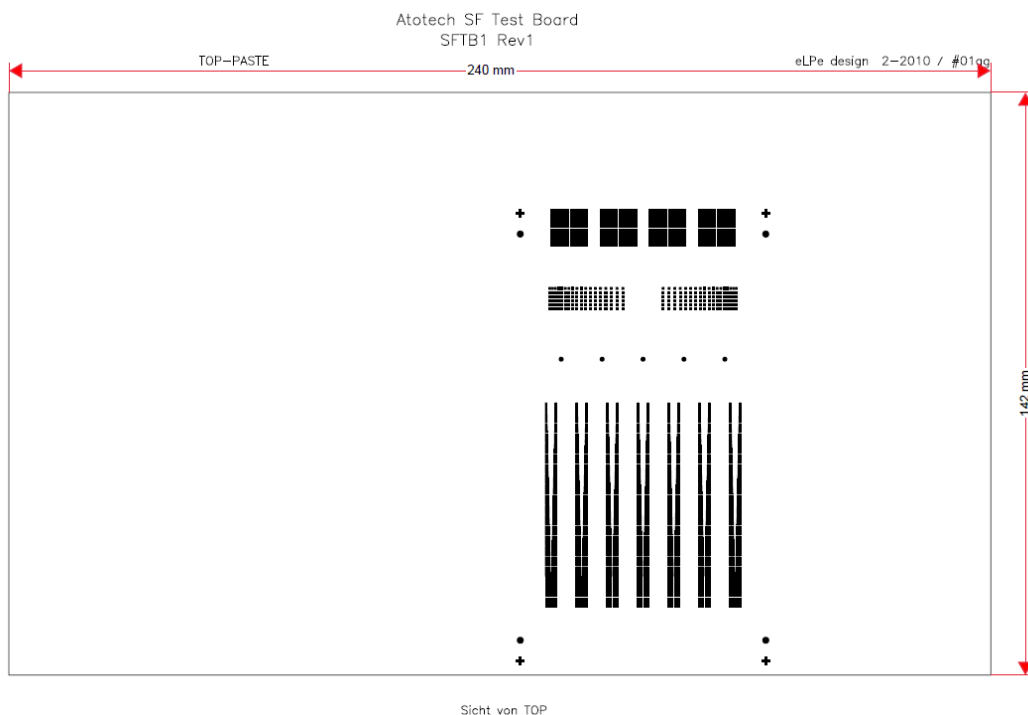
Metoda vyvinutá společností Atotech, simuluje pájení přetavením. Společnost tuto metodu používá především pro povrchovou úpravu imerzním cínem. Schéma, podle kterého se tiskne pájecí pasta a vyhodnocují se výsledky testu, je zobrazeno na obrázku 5.9.



Obr 5.9 Návrh metody solder indicator od firmy Atotech

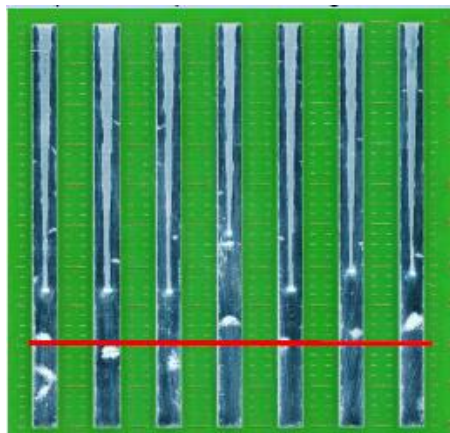
Princip metody solder indicator od firmy Atotech spočívá v tom, že je podle šablony natisknuta pájecí pasta na plošky opatřené zkoušenou povrchovou úpravou. Tyto dílky jsou očíslovány od 1 do 10. Nanesená pájecí pasta je rozdělena do dvou sloupců, přičemž se vzdálenost mezi sloupci postupně zvětšuje. Po nanesení pájecí pasty deska projde přetavovací pecí, při nastaveném teplotním profilu pro použitou pájecí pastu. Při přetavení se sloupce nanesené pasty spojují. Podle smáčivosti povrchové úpravy se sloupce spojují i v místech, kde je vzdálenost mezi nimi větší. Podle toho u jakého dílku ještě dojde ke spojení sloupců, se vyhodnocuje kvalita povrchové úpravy.

V případě imerzního cínu používá firma Atotech jako přijatelnou mez dílek číslo 2. Výsledky testu metodou solder indicator, včetně vyznačené přijatelné meze smáčení, jsou zobrazeny na obrázku 5.11. Pro ostatní povrchové úpravy firma Atotech tuto metodu testování nepoužívá. Nemá tedy ani určeno toto kritérium úspěšnosti pro další povrchové úpravy. Šablona pro tisk pájecí pasty, s uvedenými rozměry, je uvedena na obrázku 5.10. Firma Atotech používá pro tisk pájecí pasty šablonu o tloušťce 150  $\mu\text{m}$ . Testy provádí po vystavení vzorků izotermálnímu stárnutí o teplotě 155  $^{\circ}\text{C}$  po dobu 2 hodin, a po vystavení izotermálnímu stárnutí a jednom průchodu přetavovací pecí. Po těchto testech je výsledek porovnán s požadavky, tedy by pájka měla být stečená výše než je dílek 2. Teplotní profil je nastavený pro použitou pájecí pastu a používá se dusíková ochranná atmosféra. Výhodou této metody je snadné vyhodnocení, kdy není potřeba žádných výpočtů, pouze se kontroluje u kterého dílku se pájka stekla dohromady.



Obr 5.10 Šablona pro metodu solder indicator

Na původním testovacím kupónu firmy Gatema se používala lehce odlišná testovací metoda, označena ovšem také jako solder indicator, která ale byla taktéž založena na podobném principu stékání pájky po přetavení pájecí pasty. Při této metodě se nanese pájecí pasta přes šablonu s několika kruhovými otvory. Mezery mezi těmito otvory se postupně zvětšují až do vzdálenosti 1 mm. Po nanesení přes šablonu se pájecí pasta přetaví. Výsledky metody se poté vyhodnocují podle toho, kolik vrchlíků pájky se spojí. Pomocí výpočtu se zjistí smáčecí úhel podle vzdálenosti mezi kuličkami pájky a objemem nanesené pájecí pasty. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.4.



Obr 5.11 Výsledky metody solder indicator

Tab 5.4 Nejmenší smáčecí úhel pro vzdálenosti mezi otvory v šabloně [16]

| Vzdálenost středů [mm] | Vzdálenost [mm] | Smáčecí úhel [°] |
|------------------------|-----------------|------------------|
| 1,1                    | 0,1             | 27,91            |
| 1,165                  | 0,165           | 23,76            |
| 1,23                   | 0,23            | 20,37            |
| 1,295                  | 0,295           | 17,58            |
| 1,36                   | 0,36            | 15,2             |
| 1,425                  | 0,425           | 13,27            |
| 1,49                   | 0,49            | 11,64            |
| 1,555                  | 0,555           | 10,27            |
| 1,62                   | 0,62            | 9,1              |
| 1,685                  | 0,685           | 8,1              |
| 1,75                   | 0,75            | 7,24             |
| 1,815                  | 0,815           | 6,5              |
| 1,88                   | 0,88            | 5,86             |
| 1,945                  | 0,945           | 5,25             |
| 2                      | 1               | 4,83             |

## 5.5 Solder spread test

Solder spread test je testovací metoda vyvinuta firmou Atotech, která simuluje pájení přetavením. Vyhodnocuje smáčivost povrchových úprav po přetavení pájecí pasty v přetavovací peci nebo pomocí kondukcce. Sleduje smáčecí úhel podle roztečení pájky po povrchu vzorku. Testovací kupón je vybaven čtyřmi kruhovými pájecími ploškami o průměru 5 mm. Tyto kupóny jsou vždy 4.

Při testu se nejprve přes šablonu o tloušťce 100  $\mu\text{m}$  s otvory o průměru 1,5 a 2,5 mm nanese pájecí pasta na vzorky. Poté se vzorek vloží do přetavovací pece nebo se pasta nechá přetavit kondukcí. Po přetavení pasty se měřené vzorky zkoumají pod optickým mikroskopem, kde se změří průměr vrchlíku pájky a vypočítá se smáčecí úhel. Další možností je provedení mikrovýbrusu na vzorku a změření smáčecího úhlu pod mikroskopem přímo. Popřípadě kontrola vypočítaných výsledků.

Smáčecí úhel se počítá pomocí následujících rovnic 5.3–5.8, kde je potřeba znát objem pájecí pasty a průměr vrchlíku pájky po přetavení. Nejprve se vypočítá objem pájky po přetavení podle rovnice 5.3:

$$V_{páj} = \frac{\pi v}{6} (3\rho^2 + v^2) \quad (5.3)$$

kde  $V_{páj}$  je objem pájky po přetavení v  $\text{m}^3$ ,  $v$  výška vrchlíku pájky v m a  $\rho$  je jeho poloměr v m. Objem pájecí pasty po natisknutí je:

$$V = \pi r^2 t l \quad (5.4)$$

kde  $V$  je objem pájecí pasty po natisknutí v  $\text{m}^3$ ,  $r$  je poloměr otvoru šablony v m a  $tl$  je tloušťka šablony v m.

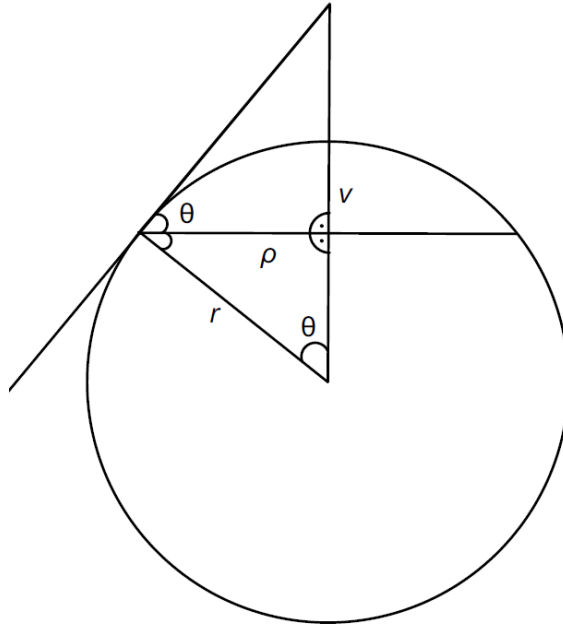


Dále pro pájecí pastu SAC305 platí vztah mezi objemem natisknuté pasty  $V_{páj}$  a objemem pájky po přetavení  $V$ :

$$V_{páj} = 0,469 * V \quad (5.5)$$

Zbývá tedy vypočítat výšku přetaveného vrchlíku pájky pro který po úpravě původního vzorce vznikne kubická rovnice, ze které vyjde jeden kladný výsledek:

$$v^3 + 3\rho^2v - \frac{6V_{páj}}{\pi} = 0 \quad (5.6)$$



Obr 5.12 Grafické zobrazení smáčecího úhlu [16]

Podle obrázku 5.11 se tedy vypočítá poloměr kružnice pomocí rovnice 5.7:

$$r = \frac{\rho^2 + v^2}{2v} \quad (5.7)$$

kde  $r$  je poloměr kružnice v m,  $\rho$  je polovina tětivy kružnice v m, a  $v$  je výška kruhové výseče v m. Dále již lze vypočítat smáčecí úhel  $\theta$  [16]:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\rho}{r} \quad (5.8)$$

Limit, který používá firma Atotech je smáčecí úhel menší než  $30^\circ$ . Po vystavení vzorků izotermálnímu stárnutí při teplotě  $155^\circ\text{C}$  po dobu dvou hodin a po izotermálním stárnutí při teplotě  $155^\circ\text{C}$  po dobu dvou hodin a průchodu přetavovací pecí, při využití ochranné dusíkové atmosféry.

Jednotlivé smáčecí úhly pro různý průměr vrchlíků pájky jsou uvedeny v tabulkách 5.5 a 5.6. Jsou zde uvedeny hodnoty pro šablony o tloušťce 100  $\mu\text{m}$  a 150  $\mu\text{m}$ , a pro průměry natisknuté pájecí pasty 1,5 mm a 2,5 mm.

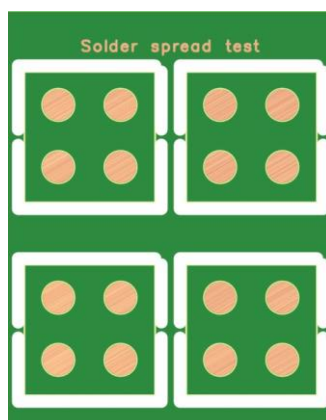
Tab 5.5 Smáčecí úhly pro průměry vrchlíku pájky (šablona 100  $\mu\text{m}$ )

| Šablona 100 $\mu\text{m}$    |             |             |
|------------------------------|-------------|-------------|
| Průměr natisknuté pasty [mm] | 1,5         | 2,5         |
| Smáčecí úhel [°]             | Průměr [mm] | Průměr [mm] |
| 30                           | 1,155       | 1,625       |
| 25                           | 1,235       | 1,730       |
| 20                           | 1,330       | 1,875       |
| 15                           | 1,470       | 2,070       |
| 10                           | 1,690       | 2,360       |
| 5                            | 2,130       | 2,990       |

Tab 5.6 Smáčecí úhly pro průměry vrchlíku pájky (šablona 150  $\mu\text{m}$ )

| Šablona 150 $\mu\text{m}$    |             |             |
|------------------------------|-------------|-------------|
| Průměr natisknuté pasty [mm] | 1,5         | 2,5         |
| Smáčecí úhel [°]             | Průměr [mm] | Průměr [mm] |
| 30                           | 1,320       | 1,860       |
| 25                           | 1,410       | 1,985       |
| 20                           | 1,525       | 2,145       |
| 15                           | 1,685       | 2,365       |
| 10                           | 1,930       | 2,715       |
| 5                            | 2,435       | 3,425       |

Testovací kupóny pro metodu solder spread test jsou zobrazeny na obrázku 5.13.



Obr 5.13 Testovací kupóny pro solder spread test

## 5.6 Dewetting test

K odsmáčení může dojít z důvodu špatné smáčivosti povrchu, který může být kontaminován nečistotami, nebo vlivem špatně nastaveného pájecího procesu. Roztavená pájka se nejprve rozteče po povrchu, ale následně se začne pájka stahovat z povrchu zpět, aby měla co nejmenší povrch. V místě, kde původně byla pájka roztečena, zůstávají zbytky vzniklé při chemických reakcích mezi pájkou a povrchem desky.

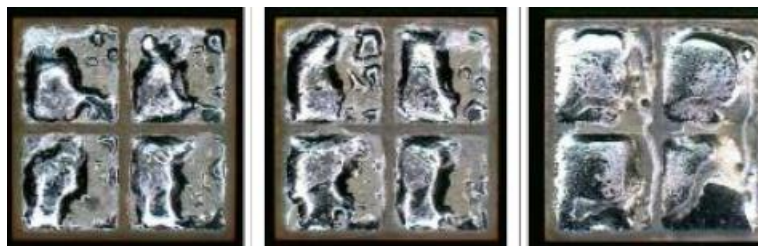
Tento test se zabývá právě sledováním odsmáčení pájky po přetavení pájecí pasty na různých povrchových úpravách. Dále se test provádí po několikanásobném průchodu vzorků přetavovací pecí. Popřípadě poté co byly vzorky vystaveny účinkům zrychleného izotermálního stárnutí.

Testovací kupón pro tento test je ve formě čtyř oboustranně plátovaných desek o rozměrech 10 x 10 mm, které jsou opatřeny testovanou povrchovou úpravou. Na desky se nanese přes šablonu o tloušťce 100  $\mu\text{m}$  pájecí pasta. Poté desky projdou přetavovací pecí. Vyhodnocení probíhá pomocí vizuální kontroly. Vzorek může být případně vložen pod optický mikroskop, kde se sleduje zda není na vzorcích viditelné odsmáčení.

Norma J-STD-002D uvádí, že by úroveň odsmáčení povrchu měla být menší než 5% povrchu pokrytého pájkou. [22]

Pro reprodukovatelnost této metody je důležité především nastavení přetavovacího procesu. Nastavení přetavovacího profilu závisí na použité pájecí pastě. V případě této práce byla použita pasta SAC305, a tedy i teplotní profil pro tuto pájecí pastu.

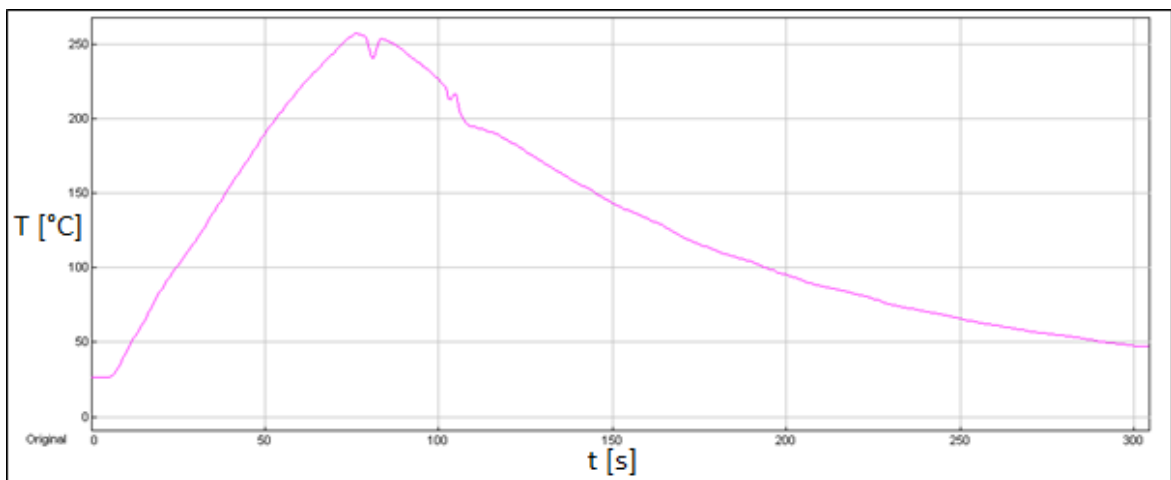
Další možnosti využití tohoto testu jsou testování vlivů zrychleného stárnutí při zvýšené konstantní teplotě, popřípadě při kombinaci se zvýšenou vlhkostí. Zrychlené stárnutí probíhá v případě vystavení zvýšené teplotě v sušičce plošných spojů. V případě zvýšené vlhkosti jsou vzorky vloženy do klimatické komory. Po vystavení tomuto namáhání by mělo dojít ke zhoršení smáčivosti, případně právě ke zvýšení úrovně odsmáčení. Na tyto vnější vlivy by měla být nejvíce náchylná povrchová úprava imerzním cínem. Technologie ENIG by měla být díky vrstvě zlata před vnějšími vlivy velmi dobře chráněna. Na obrázku 5.14 je zobrazen výsledek metody dewetting test, kde došlo k viditelnému odsmáčení.



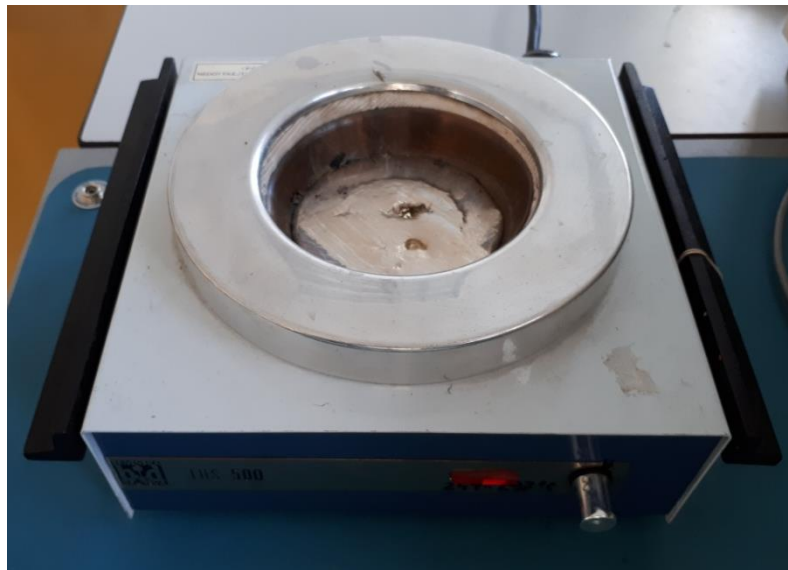
Obr 5.14 Výsledky metody dewetting test [23]

## 5.7 Přetavení pomocí kondukce

Jedna z metod přetavení pájecí pasty je přetavení pomocí kondukce v topném hnízdě THS 500 (obrázek 5.13). Tento způsob je založen na principu položení vzorku s natisknutou pájecí pastou na hladinu roztavené pájky, kde se pomocí vedení tepla pájecí pasta přetaví. Lázeň s pájkou je vyhřívána pomocí topného tělesa. Nevýhodou je, že neudrží konstantní teplotu, ale je vyhřívána na teplotu v rozmezí 244-297 °C. Desku s natisknutou pastou SAC305 je nutné vyhřát přibližně na teplotu 230 °C, aby došlo k přetavení. Na obrázku 5.15 je zobrazen změřený teplotní profil desky vložené na roztavenou pájku. Zde je vidět, že teploty přetavení dosáhne za přibližně 50 sekund. Nevýhodou této metody je obtížnější reprodukovatelnost. Na obrázku 5.16 je používané topné hnízdo.



Obr 5.15 Teplotní profil při pájení kondukcí

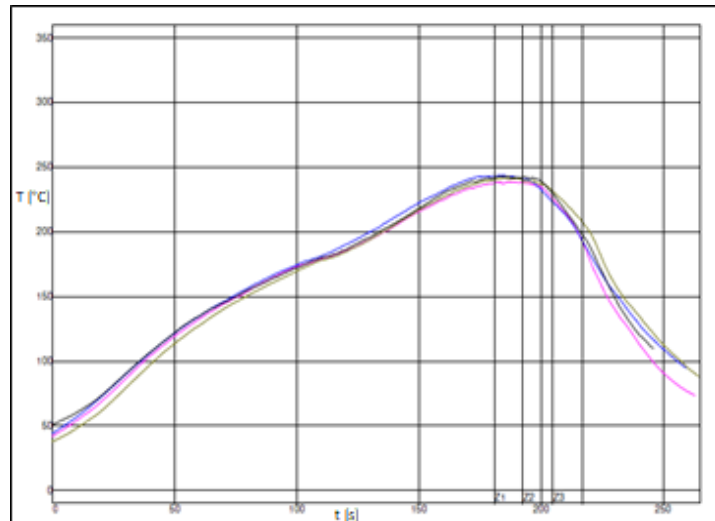


Obr 5.16 Topné hnízdo THS 500

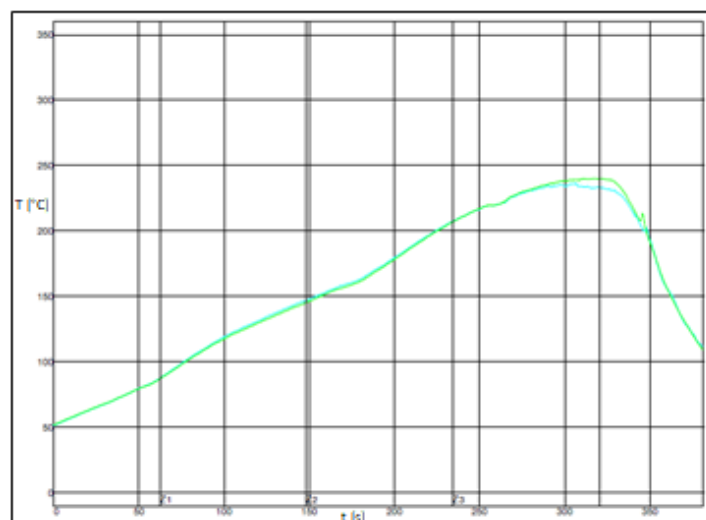
## 5.8 Přetavení v pájecí peci

Pro pájení v přetavovací peci byla použita pec DIMA SMRO 180. Tato pec má tři nastavitelné zóny. Pro testovací metody byly použity dva přetavovací profily, které byly změřeny pomocí termočlánků.

První byl použit pro solder spread test a pro solder indicator, kdy byly teploty nastaveny na 300 °C, 300 °C a 360 °C. Pro dewetting test bylo použito nastavení teplot 300 °C, 300 °C a 380 °C, neboť jsou testovací kupóny pokryty poměrně velkou plochou mědi a je tedy náročnější dosáhnout zde požadovaných teplot. Naměřené teplotní profily jsou zobrazeny na obrázcích 5.17 a 5.18. První přetavovací profil byl také využit pro vystavení vzorků, určených pro wetting balance test a edge dip test, průchodům přetavovací pecí.



Obr 5.17 Teplotní profil pro testy solder indicator a solder spread test



Obr 5.18 Teplotní profil pro dewetting test

## 5.9 Izotermální stárnutí

Izotermální stárnutí měřených vzorků probíhalo v sušičce plošných spojů HS61A. Teplota, při které stárnutí probíhalo, byla nastavena na 155 °C. Vzorky zde byly ponechány po dobu 1 h, popřípadě 2 h. Po vyjmutí vzorků ze sušičky bylo nezbytné nechat je aklimatizovat na teplotu v laboratoři než se přistoupilo k samotnému testování.

## 5.10 Mikrovýbrus

Metalografický výbrus, neboli mikrovýbrus, slouží k provádění kontrol při výrobě desek plošných spojů. V tomto případě byl mikrovýbrus využit pro kontrolní měření smáčecího úhlu pod optickým mikroskopem.

Postup mikrovýbrusu:

- Oddělí se zkoumaná část vzorku.
- Vnitřek vylévací formy se potře tenkou vrstvou separátoru.
- V homogenizační nádobě se smíchají obě složky technického dentacrylu v požadovaném poměru, a promíchá se.
- Vzorek se zafixuje ve vylévací formě kolmo ke dnu nádoby.
- Forma se vylije dentacrylem tak, aby vzniklo minimum bublinek.
- Zalitý vzorek se nechá zpolymerovat za pokojové teploty po dobu několika hodin.
- Vzorek se vyjme z formy a opláchne se, popřípadě vyčistí v ultrazvukové myčce.
- Vzorek se brousí pomocí brusných papírů o zrnitosti 200, dále se postupně mění brusný papír se zrnitostí 600 a 1200. Při broušení se užívá proud vody. Broušení pokračuje dokud se broušený povrch nedostane ke zkoumanému místu. Vzorek opět opláchne vodou a vloží do ultrazvukové myčky.
- Provede se leštění pomocí leštícího plátna s emulzí o drsnosti 1  $\mu\text{m}$ . Poté se vzorek opět opláchne a vloží do ultrazvukové myčky.

Po provedení mikrovýbrusu se vzorek zkoumá pod optickým mikroskopem a změří se smáčecí úhel.

## 6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Níže je uveden rozpis testovaných povrchových úprav. Jsou zde vypsány testy, které byly zkoušeny a podmínky, kterým byly vystaveny.

### Testované povrchové úpravy:

- ENIG
- Imerzní cín

### Materiál testovacího kupónu:

- Oboustranně plátovaná FR4 typ DE104 od firmy ISOLA

### Použitá pájecí pasta:

- Qualitek 825 SAC305 – tavidlo ROL0

### Provedené zkoušky povrchových úprav:

- Vizualní kontrola
  - Sledování změny barvy následkem izotermálního stárnutí.
- Solder indicator
  - 3 různé šablony (velikost otvorů 2.0, 2.1, 2.2 mm) vyrobené leptáním o tloušťce 100  $\mu\text{m}$ .
  - Natisknutí pájecí pasty.
  - Přetavení pasty v přetavovací peci s definovaným teplotním profilem.
  - Zjištění úrovně, které bylo testem dosaženo.
  - Porovnání výsledků s různými šablonami.
  - Porovnání povrchových úprav.
  - Určení limitu (především pro ENIG).
- Solder spread test
  - Šablona o tloušťce 100  $\mu\text{m}$ .
  - Natisknutí pájecí pasty.
  - Přetavení pasty, v přetavovací peci s definovaným teplotním profilem.
  - Změření průměru vrchlíku pájky pod optickým mikroskopem.
  - Výpočet smáčecího úhlu.
  - Mikrovýbrus.
  - Změření smáčecího úhlu, porovnání.
- Dewetting test
  - Šablona o tloušťce 100  $\mu\text{m}$ .
  - Natisknutí pájecí pasty.
  - Přetavení pasty v přetavovací peci s definovaným teplotním profilem.
  - Vizualní kontrola – zjištění úrovně odsmačení.

- Wetting balance test (metoda smáčecích vah).
  - Změření smáčecích charakteristik pomocí smáčecích vah.
  - Porovnání s požadavky normy IPC.
  - Určení limitů.
- Edge dip test
  - Ponoření vzorků do pájky pomocí smáčecích vah.
  - Vizuální kontrola.

**Prováděné zkoušky po zrychleném stárnutí a průchodech přetavovací pecí:**

- Solder indicator, solder spread test, dewetting test
  - Po dodání
  - Po průchodu přetavovací pecí – 1x
  - Po izotermálním stárnutí (1h 155°C)
  - Po izotermálním stárnutí (1h 155°C) a průchodu přetavovací pecí
  - Po izotermálním stárnutí (2h 155°C)
  - Po izotermálním stárnutí (2h 155°C) a průchodu přetavovací pecí
- Wetting balance test, edge dip test
  - Po dodání
  - Po průchodu přetavovací pecí – 1x, 2x
  - Po izotermálním stárnutí (1h 155°C)
  - Po izotermálním stárnutí (1h 155°C) a průchodu přetavovací pecí
  - Po izotermálním stárnutí (1h 155°C) a dvou průchodech přetavovací pecí
  - Po izotermálním stárnutí (2h 155°C)
  - Po izotermálním stárnutí (2h 155°C) a průchodu přetavovací pecí
  - Po izotermálním stárnutí (2h 155°C) a dvou průchodech přetavovací pecí



## 6.1 Wetting balance test

Při měření smáčecích charakteristik metodou smáčecích vah bylo použito 8 vzorků pro technologii ENIG a 8 vzorků pro povrchovou úpravu imerzním cínem. Vzorky měly rozměry 20 mm x 5 mm x 1 mm, jednalo se o oboustraně plátovaný laminát FR-4 s požadovanou povrchovou úpravou měděného povrchu.

Na měřenou část vzorku bylo nanášeno VOC-free tavidlo Kester 979T Typ ORL0. Poté byl odstraněn jeho přebytek a vzorky byly umístěny do meniskografu MULTICORE Must I. Vzorek se ponořil do pájky SAC305. Měřící pracoviště je zobrazeno na obrázku 6.1.

Protože wetting balance test se na rozdíl od většiny ostatních testů neprovádí pomocí průchodu přetavovací pecí, probíhalo testování u vzorků vystaveným lehce jiným podmínkám. Vzorky tedy byly měřeny po dodání a postupně po jednom a dvou průchodech přetavovací pecí. Poté po vystavení izotermálnímu stárnutí při teplotě 155 °C, po dobu 1 h a 2 h. Po izotermálním stárnutí byly vzorky opět ještě měřeny po průchodech přetavovací pecí, při nastavení přetavovacího profilu pro bezolovnaté pájení.

Nastavení meniskografu:

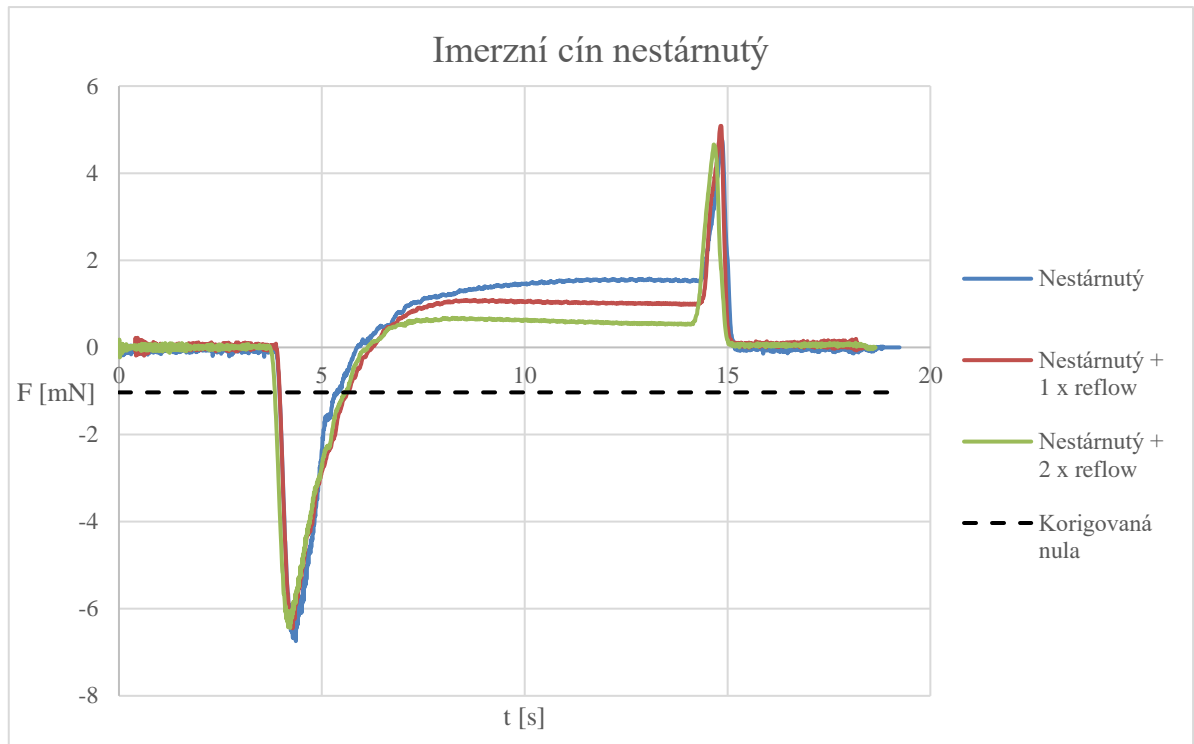
- Teplota pájky: 255 °C
- Ponor: 3 mm
- Prodleva v lázni: 10 s
- Rychlost ponoru: 10 mm·s<sup>-1</sup>.

Po změření smáčecích charakteristik se získané hodnoty ze všech osmi měření zprůměrovaly a vytvořil se výsledný graf. Tyto výsledky jsou uvedeny na obrázcích 6.2 – 6.7.

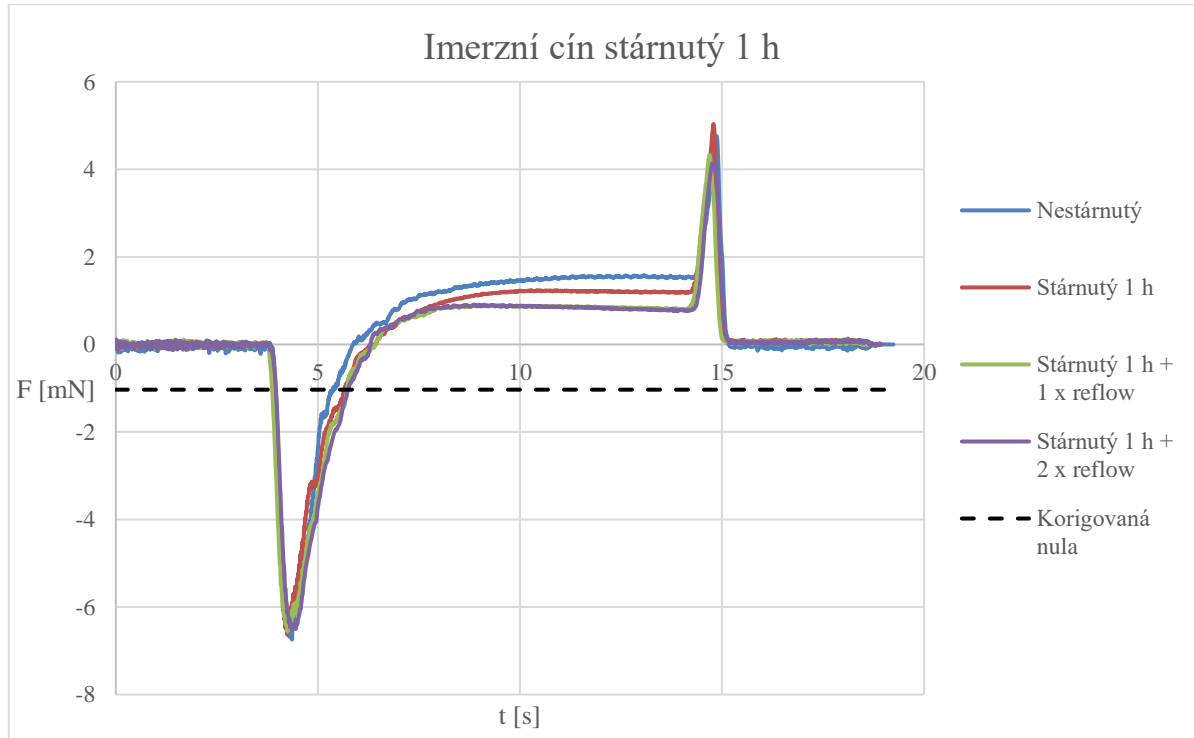


Obr 6.1 Měřící pracoviště s meniskografem

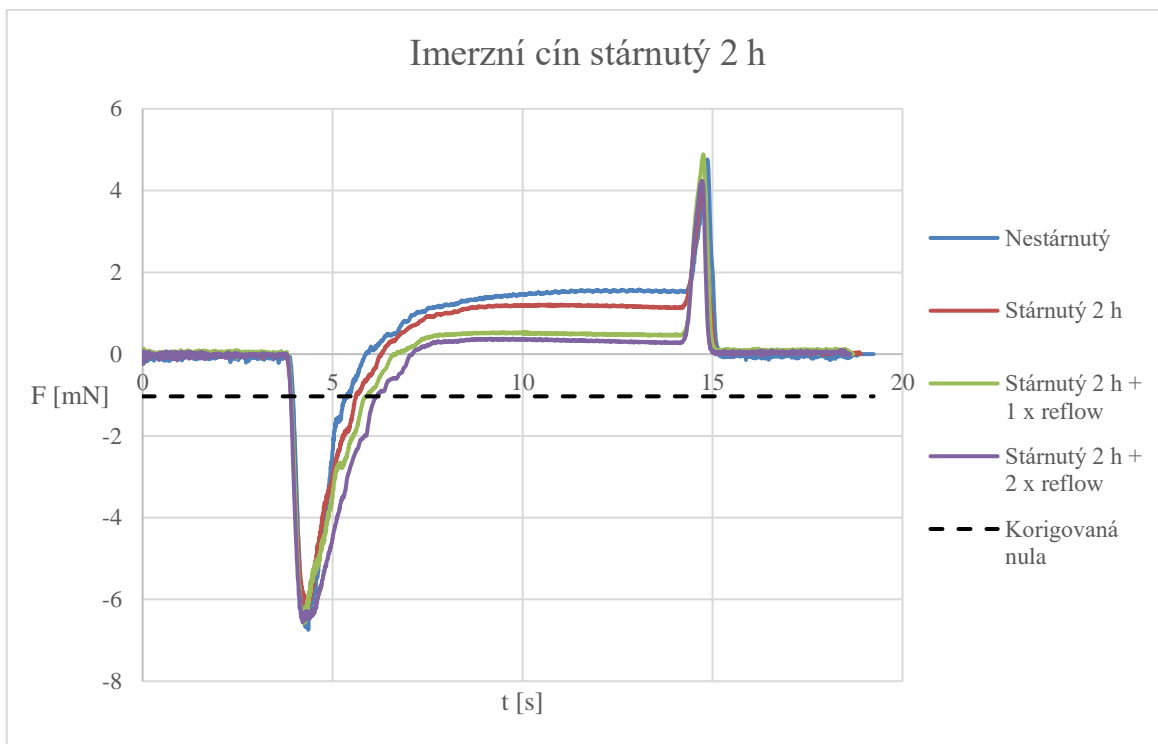
S



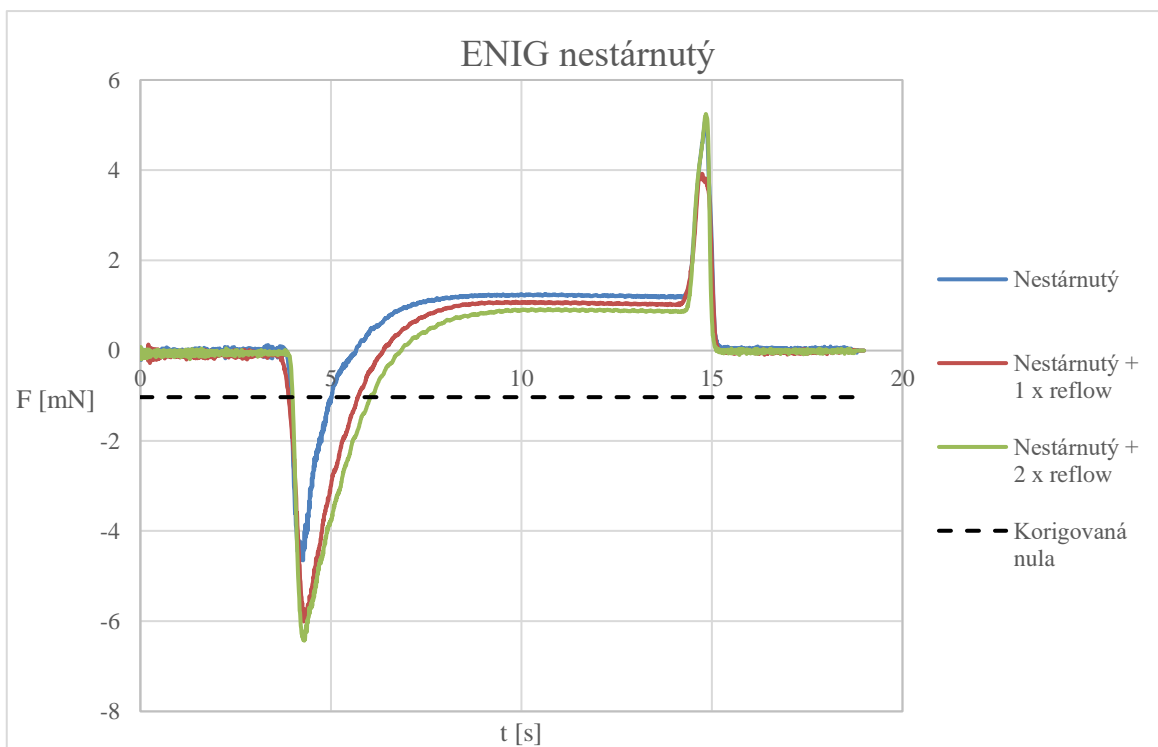
Obr 6.2 Smáčecí charakteristiky pro nestárnutý imerzní cín



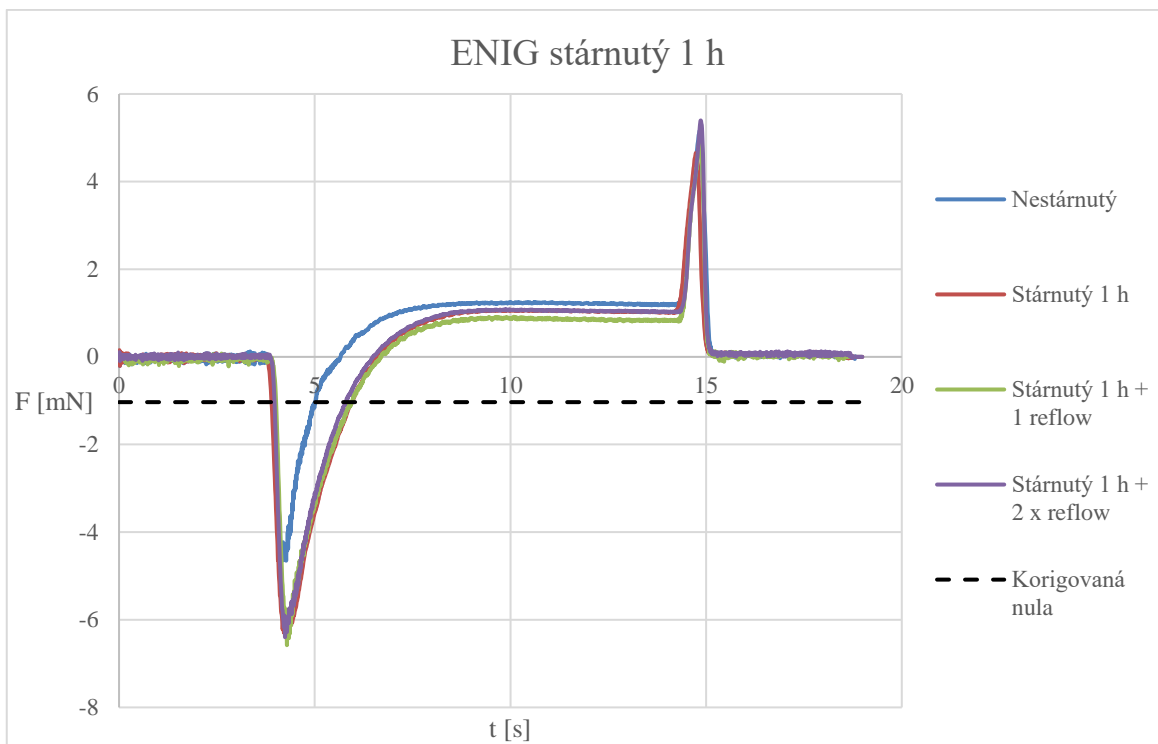
Obr 6.3 Smáčecí charakteristiky pro imerzní cín stárnutý 1 h



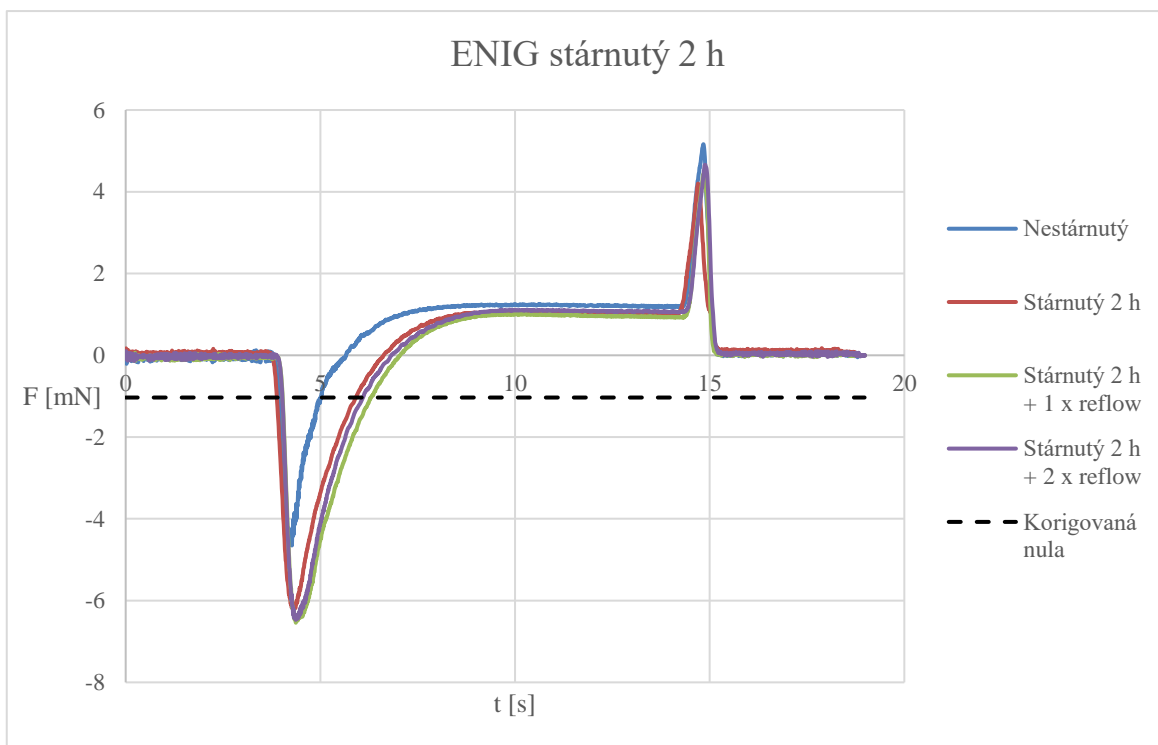
Obr 6.4 Smáčecí charakteristiky pro imerzní cín stárnutý 2 h



Obr 6.5 Smáčecí charakteristiky pro nestárnutý ENIG



Obr 6.6 Smáčecí charakteristiky pro ENIG stárnutý 1 h



Obr 6.7 Smáčecí charakteristiky pro ENIG stárnutý 2 h

Pro získání výsledků musela být vypočítána vztlaková síla působící na vzorek ponořený v pájce. Tato síla se poté přičetla k naměřené síle, čímž se získala korigovaná nulová osa, od které se měřila celková smáčecí síla. K výpočtu byla použita rovnice 5.2.

$$F_{vz} = \rho g V$$

Kde: hustota pájky SAC305  $\rho = 7020 \text{ kgm}^{-3}$   
 gravitační zrychlení  $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$   
 objem ponořeného vzorku  $V = a \cdot b \cdot c = 5 \cdot 3 \cdot 1 = 15 \text{ mm}^3$

$$F_{vz} = \rho g V = 7020 \cdot 9,81 \cdot 15 \cdot 10^{-9} = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Z naměřených hodnot byl poté vypočítán poměr  $F2/t_{2/3}$ , což je poměr mezi maximální smáčecí silou a časem, kdy je dosaženo 2/3 této hodnoty. Byl také vypočítán smáčecí úhel.

Dále byl zjištěn čas, kdy bylo dosaženo korigované nuly. Byla odečtena smáčecí síla, které bylo dosaženo po 2 s a po 5 s. Nakonec se vypočítala síla, které bylo dosaženo v poměru na smáčivý obvod vzorku. Tyto hodnoty byly porovnány s požadavky normy IPC J-STD 003C. Naměřené a vypočítané hodnoty z provedených testů jsou uvedeny v tabulkách 6.4 a 6.5.

Teoretická maximální smáčecí síla a celková teoretická maximální síla:

$$V = (p - 2c) \cdot c \cdot a = (12 - 2 \cdot 1) \cdot 1 \cdot 3 = 30 \text{ mm}^3$$

Objem je počítán podle normy IPC J-STD 003C, měl by v něm být započítán vliv nesmáčivých stran vzorku.

$$F2_{teor} = \gamma p \cos \theta = 0,5 \cdot 12 \cdot \cos 0 = 6 \text{ mN}$$

kde  $p$  je smáčivý obvod vzorku,  $c$  je tloušťka vzorku, veličina  $a$  je hloubka ponoru. Všechny hodnoty jsou v milimetrech.,  $F_{teor}$  vyjadřuje maximální teoretickou smáčecí sílu v mN,  $\gamma = 0,5 \text{ mN/mm}$  je povrchové napětí roztavené pájky v mN/mm,  $\rho$  je hustota pájky,  $g$  představuje gravitační zrychlení v  $\text{mm/s}^2$ .

$$25\% F_{teor} = \frac{6}{4} = 1,5 \text{ mN}$$

Tab 6.1 Naměřené a vypočítané hodnoty pro imerzní cín

| <b>Im. Sn</b>                               | <b>Po<br/>dodání</b> | <b>1 x<br/>reflow</b> | <b>2 x<br/>reflow</b> | <b>1h</b> | <b>1 h +<br/>1 x reflow</b> | <b>1 h +<br/>2 x reflow</b> | <b>2 h</b> | <b>2 h +<br/>1 x reflow</b> | <b>2 h +<br/>2 x reflow</b> |
|---------------------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>F<sub>max</sub> [mN]</b>                 | 1,58                 | 1,09                  | 0,68                  | 1,24      | 0,89                        | 0,91                        | 1,22       | 0,54                        | 0,38                        |
| <b>F<sub>vz</sub> [mN]</b>                  | 1,03                 | 1,03                  | 1,03                  | 1,03      | 1,03                        | 1,03                        | 1,03       | 1,03                        | 1,03                        |
| <b>F<sub>2</sub> [mN]</b>                   | 2,61                 | 2,12                  | 1,71                  | 2,27      | 1,93                        | 1,94                        | 2,25       | 1,58                        | 1,41                        |
| <b>F<sub>2/3</sub> [mN]</b>                 | 1,74                 | 1,42                  | 1,14                  | 1,51      | 1,29                        | 1,29                        | 1,49       | 1,05                        | 0,94                        |
| <b>t<sub>2/3</sub> [s]</b>                  | 3,00                 | 2,76                  | 2,43                  | 3,16      | 2,77                        | 2,62                        | 2,95       | 2,89                        | 3,20                        |
| <b>F<sub>2</sub>/t<sub>2/3</sub> [mN/s]</b> | 0,87                 | 0,77                  | 0,71                  | 0,72      | 0,69                        | 0,74                        | 0,76       | 0,55                        | 0,44                        |
|                                             |                      |                       |                       |           |                             |                             |            |                             |                             |
| <b>T<sub>0</sub> [s]</b>                    | 1,54                 | 1,82                  | 1,77                  | 1,85      | 1,92                        | 1,95                        | 1,81       | 2,09                        | 2,36                        |
| <b>F<sub>2s</sub> [mN]</b>                  | 0,87                 | 0,34                  | 0,57                  | 0,29      | 0,39                        | 0,15                        | 0,33       | -0,10                       | -1,01                       |
| <b>F<sub>5s</sub> [mN]</b>                  | 2,37                 | 2,11                  | 1,68                  | 2,14      | 1,90                        | 1,91                        | 2,18       | 1,54                        | 1,39                        |
| <b>Θ [°]</b>                                | 57,73                | 64,14                 | 69,26                 | 62,27     | 66,62                       | 66,41                       | 62,55      | 70,95                       | 72,91                       |
| <b>F<sub>2</sub>/p [mN/mm]</b>              | 0,22                 | 0,18                  | 0,14                  | 0,19      | 0,16                        | 0,16                        | 0,18       | 0,13                        | 0,12                        |

Tab 6.2 Naměřené a vypočítané hodnoty pro ENIG

| <b>ENIG</b>                                 | <b>Po<br/>dodání</b> | <b>1 x<br/>reflow</b> | <b>2 x<br/>reflow</b> | <b>1 h</b> | <b>1 h +<br/>1 x reflow</b> | <b>1 h +<br/>2 x reflow</b> | <b>2 h</b> | <b>2 h +<br/>1 x reflow</b> | <b>2 h +<br/>2 x reflow</b> |
|---------------------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>F<sub>max</sub> [mN]</b>                 | 1,25                 | 1,09                  | 0,92                  | 1,08       | 0,92                        | 1,09                        | 1,09       | 1,01                        | 1,12                        |
| <b>F<sub>vz</sub> [mN]</b>                  | 1,03                 | 1,03                  | 1,03                  | 1,03       | 1,03                        | 1,03                        | 1,03       | 1,03                        | 1,03                        |
| <b>F<sub>2</sub> [mN]</b>                   | 2,29                 | 2,12                  | 1,95                  | 2,11       | 1,95                        | 2,12                        | 2,12       | 2,04                        | 2,15                        |
| <b>F<sub>2/3</sub> [mN]</b>                 | 1,52                 | 1,41                  | 1,30                  | 1,41       | 1,30                        | 1,41                        | 1,41       | 1,36                        | 1,43                        |
| <b>t<sub>2/3</sub> [s]</b>                  | 2,29                 | 2,99                  | 3,34                  | 3,19       | 3,20                        | 3,10                        | 3,23       | 3,58                        | 3,50                        |
| <b>F<sub>2</sub>/t<sub>2/3</sub> [mN/s]</b> | 0,99                 | 0,71                  | 0,59                  | 0,66       | 0,61                        | 0,68                        | 0,66       | 0,57                        | 0,61                        |
|                                             |                      |                       |                       |            |                             |                             |            |                             |                             |
| <b>T<sub>0</sub> [s]</b>                    | 1,20                 | 1,89                  | 2,24                  | 2,15       | 2,13                        | 2,00                        | 2,11       | 2,50                        | 2,29                        |
| <b>F<sub>2s</sub> [mN]</b>                  | 1,27                 | 0,17                  | -0,44                 | -0,33      | -0,29                       | 0,00                        | -0,19      | -1,04                       | -0,61                       |
| <b>F<sub>5s</sub> [mN]</b>                  | 2,25                 | 2,07                  | 1,83                  | 2,06       | 1,86                        | 2,07                        | 2,06       | 1,94                        | 2,03                        |
| <b>Θ [°]</b>                                | 62,08                | 64,21                 | 66,31                 | 64,31      | 66,35                       | 64,21                       | 64,20      | 65,19                       | 63,81                       |
| <b>F<sub>2</sub>/p [mN/mm]</b>              | 0,19                 | 0,18                  | 0,17                  | 0,18       | 0,17                        | 0,18                        | 0,18       | 0,17                        | 0,18                        |

Příklad výpočtů pro tabulku 6. 1 první sloupec:

$$F_{vz} = \rho g V = 7020 \cdot 9,8 \cdot 15 \cdot 10^{-9} = 1,033 \cdot 10^{-3} \text{ N} = 1,03 \text{ mN}$$

$$F_{max} = 1,58 \text{ mN (Odečteno z grafu)}$$

$$F_2 = F_{max} + F_{vz} = 1,58 + 1,03 = 2,61 \text{ mN}$$

$$F_{2/3} = \frac{2}{3} \cdot F_2 = \frac{2}{3} \cdot 2,61 = 1,74 \text{ mN}$$

$$t_{2/3} = 3,00 \text{ s (Odečteno z grafu)}$$

$$F_2/t_{2/3} = \frac{1,74}{3,00} = 0,87 \text{ mN/s}$$

$$T_0 = 1,54 \text{ s (Odečteno z grafu)}$$

$$F_{2s} = 0,87 \text{ mN (Odečteno z grafu)}$$

$$F_{5s} = 2,37 \text{ mN (Odečteno z grafu)}$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{F_2 - F_{vz}}{\gamma p}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{2,61 - 1,03}{0,5 \cdot 10}\right) = 57,73^\circ$$

$$F_2/p = \frac{2,61}{12} = 0,22 \text{ mN/mm}$$

kde  $F_{vz}$  je vztlaková síla působící na ponořenou část,  $F_{\max}$  je maximální síla,  $F_2$  je maximální smáčecí síla od korigované nuly,  $F_{2/3}$  představuje hodnotu  $2/3 F_2$ ,  $t_{2/3}$  je čas, kdy je této síly dosaženo.  $T_0$  vyjadřuje čas, kdy je dosaženo korigované nuly.  $F_{2s}$  a  $F_{5s}$  jsou síly, kterých je dosaženo po 2 a 5 sekundách měření.  $\theta$  představuje smáčecí úhel a  $p$  je smáčivý obvod vzorku.

Výsledné hodnocení je uvedeno v kapitole Diskuze výsledků.

## 6.2 Edge dip test

Pro edge dip test byly použity podobné vzorky jako pro metodu smáčekých vah. Nebyly ovšem celé pokryté mědí, ale bylo na nich několik menších padů. Bylo testováno vždy 8 vzorků pro každý zkoumaný případ.

Testování probíhalo na meniskografu MULTICORE Must I. Vzorek byl testovanou částí ponořen do tavidla Kester 979T, poté se z něj odstranil přebytek. Po uchycení do meniskografu se vzorek ponořil do pájky SAC305. Při tomto testu nebyly měřeny smáčekcí charakteristiky. Po nanesení pájky na vzorek se zkoumal vizuální kontrolou. Zjišťovalo se, jestli byly pokryty všechny pady na vzorku pájkou a jestli nedošlo k jejímu odsmáčení.

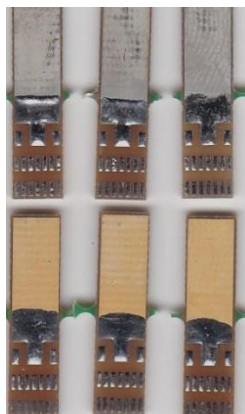
Vzorky byly testovány stejně jako u wetting balance testu po vystavení izotermálnímu stárnutí při teplotě 155 °C, po dobu 1 h a 2h. A pokaždé i po následném průchodu přetavovací peci. Přetavovací profil byl nastaven pro bezolovnatou pájecí pastu SAC305.

Nastavení meniskografu se lišilo pouze ve hloubce ponoru, neboť šlo především o ponoření všech padů do pájky.

Nastavení meniskografu:

- Teplota pájky: 245 °C
- Ponor: 6 mm
- Prodleva v lázni: 10 s
- Rychlost ponoru: 10 mms<sup>-1</sup>.

Příklad vzorků po provedení testu je zobrazen na obrázku 6.8.



Obr 6.8 Vzorky pro edge dip test (nahore imerzní cín, dole ENIG)

Při tomto testu u všech vzorků ENIGu i imerzního cínu došlo k pokrytí veškerých padů pájkou ale nedošlo k odsmáčení povrchu.



## 6.3 Solder indicator

Každý test metodou solder indicator byl proveden na jednom testovacím kupónu, který se skládal ze sedmi testovacích plošek. Na tyto plošky byla přes šablonu nanášena pájecí pasta SAC305. Nanášená pájecí pasta byla rozdělena do dvou sloupců, přičemž vzdálenost mezi nimi se postupně zvětšovala. Po natisknutí pasty byly vzorky vloženy do přetavovací pece, kde došlo k přetavení pájecí pasty. Každý vzorek byl opatřen stupnicí od 0 do 10. Poté se zkoumalo v jaké největší vzdálenosti došlo ke stečení sloupců pájky.

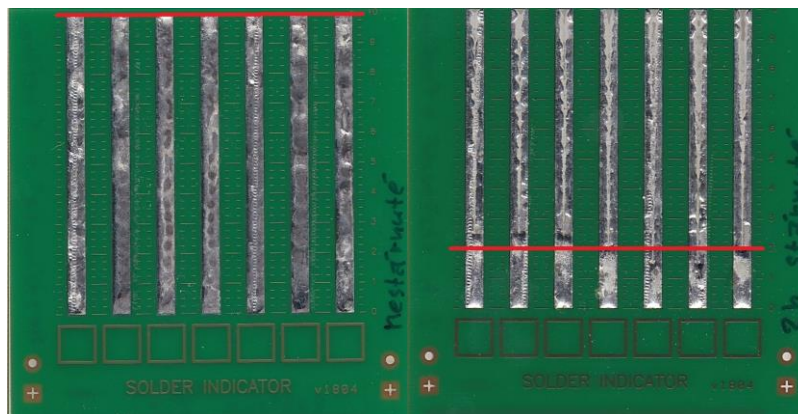
Vzorky byly testovány po dodání a po vystavení izotermálnímu stárnutí po dobu 1 a 2 hodin při teplotě 155 °C. Po otestování byla na každý vzorek natisknuta pájecí pasta z opačné strany a test byl proveden znovu, tedy se zjistil vliv více průchodů přetavovací pečí.

Dále byly testovány různé šablony pro tisk pájecí pasty. Rozdíl mezi šablonami byl ve velikosti otvorů pro tisk. Jejich velikost se měnila po 0,1 mm. Šablony měly otvory o velikosti 2,0; 2,1 a 2,2 mm. Testování vlivu různých šablon bylo provedeno u vzorků po dodání a po jednom průchodu přetavovací pečí.

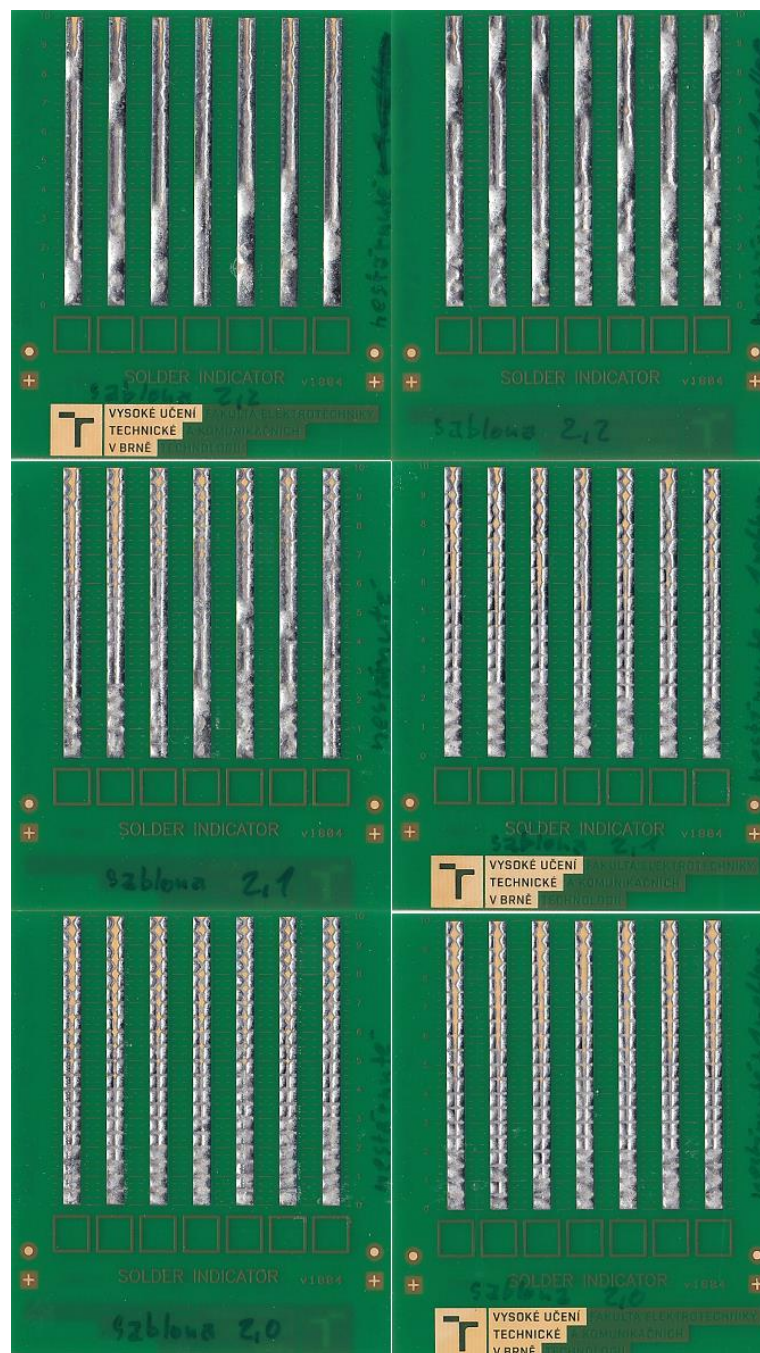
Hodnoty kterých bylo dosaženo pomocí metody solder indicator jsou uvedeny v tabulce 6.3. Na obrázku 6.9 je ukázka vyhodnocení metody solder indicator pro šablonu s velikostí otvorů 2,2 mm.

Tab 6.3 Naměřené hodnoty metodou solder indicator

|                           | ENIG | Imerzní cín |
|---------------------------|------|-------------|
| Nestárnuté                | 3    | 10          |
| Nestárnuté + 1 x reflow   | 2,5  | 2           |
| Stárnuté 1 h              | 2,75 | 2,25        |
| Stárnuté 1 h + 1 x reflow | 3    | 2           |
| Stárnuté 2 h              | 2,5  | 2           |
| Stárnuté 2 h + 1 x reflow | 2,5  | 2,25        |

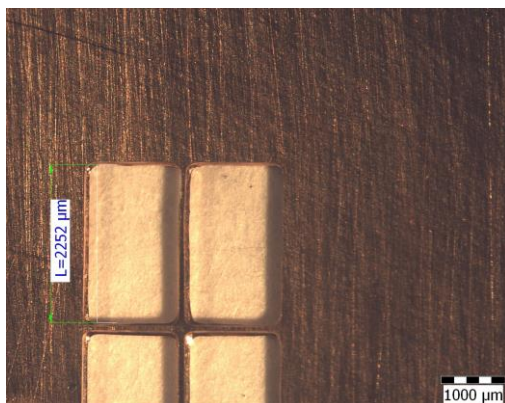


Obr 6.9 Vyhodnocení testu solder indicator (imerzní cín – nestárnutý, stárnutý 2 h)



Obr 6.10 Výsledky solder indicatoru pro různé šablony (zhora 2,2; 2,1 a 2,0 mm)

Na obrázku 6.10 je rozdíl v dosažených výsledcích solder indicatoru při použití různých šablon. Vlevo jsou nestárnuté vzorky, vpravo vzorky po průchodu přetavovací pecí. Na obrázcích 6.11 a 6.12 jsou zobrazeny kontrolní měření otvorů v šablonách. Rozdíl mezi návrhem a vyleptanými otvory je minimální a pohybuje se pouze v řádu setin milimetru.



Obr 6.11 Šablona 2,2 mm



Obr 6.12 Šablona 2,0 mm

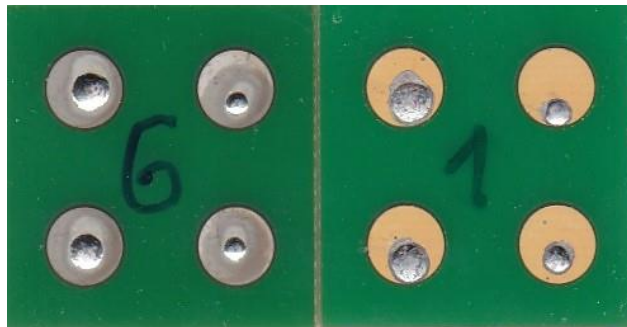
Všechny měřené vzorky tedy prošly úspěšně nad limitem 2, ovšem výsledky nejsou příliš vypovídající, především u imerzního cínu došlo k prudkému zhoršení vzhledem k nestárnutým vzorkům a poté se výsledné hodnoty téměř neměnily. U ENIG se naopak výsledky během celého měření téměř neměnily.

## 6.4 Solder spread test

Pro solder spread test byly vždy testovány tři kupóny, kde na každém jsou 4 kruhové pájecí plošky. Na každý kupón byla přes šablonu s kruhovými otvory o průměru 1,5 mm a 2,5 mm, nanesena pájecí pasta. Poté vzorky prošly přetavovací pecí, kde se pájka přetavila. Pod optickým mikroskopem se změřil průměr vrchlíku pájky a byl vypočítán smáčecí úhel.

Vzorky byly testovány po dodání, a po vystavení izotermálnímu stárnutí při teplotě 155 °C, po dobu 1 h a 2 h. Po provedení testu byla pájecí pasta natisknuta z druhé strany kupónu a test byl proveden znovu, tedy byly vzorky testovány po druhém průchodu přetavovací pecí. Teplotní profil byl nastaven pro bezolovnaté pájení pájecí pastou SAC305.

Příklad výsledků solder spread testu, pro nestárnutý ENIG a imerzní cín po vystavení izotermálnímu stárnutí a po průchodu přetavovací pecí, je uveden na obrázku 6.13. Vypočítané smáčecí úhly jsou zobrazeny v grafech na obrázcích 6.14 – 6.17.



Obr 6.13 Solder spread test (zleva imerzní cín 2 h + 2x reflow, ENIG nestárnutý)

Po zjištění smáčecích úhlů, pro jednotlivé zkoumané případy, byl vypočítán průměr a vytvořen graf. Výsledné smáčecí úhly jsou uvedeny v tabulce 6.4 a 6.5.

Tab 6.4 Tabulka vypočítaných smáčecích úhlů pro imerzní cín

| Průměr [°]                | Imerzní cín      |                      |                  |                      |
|---------------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
|                           | 1,5              |                      | 2,5              |                      |
|                           | Smáčecí úhel [°] | Průměr vrchlíku [mm] | Smáčecí úhel [°] | Průměr vrchlíku [mm] |
| Nestárnutý                | 5,89             | 2044,50              | 7,44             | 2626,83              |
| Nestárnutý + 1 x reflow   | 8,56             | 1782,83              | 10,09            | 2425,83              |
| Stárnutý 1 h              | 14,97            | 1505,17              | 11,15            | 2290,00              |
| Stárnutý 1 h + 1 x reflow | 15,58            | 1460,33              | 11,81            | 2251,33              |
| Stárnutý 2 h              | 15,94            | 1448,17              | 13,89            | 2135,83              |
| Stárnutý 2 h + 1 x reflow | 17,38            | 1402,83              | 14,01            | 2118,33              |

Tab 6.5 Tabulka vypočítaných smáčecích úhlů pro ENIG

| Průměr [°]                | ENIG             |                      |                  |                      |
|---------------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
|                           | 1,5              |                      | 2,5              |                      |
|                           | Smáčecí úhel [°] | Průměr vrchlíku [mm] | Smáčecí úhel [°] | Průměr vrchlíku [mm] |
| Nestárnutý                | 9,98             | 1693,50              | 8,25             | 2541,50              |
| Nestárnutý + 1 x reflow   | 11,69            | 1604,50              | 9,69             | 2407,67              |
| Stárnutý 1 h              | 10,08            | 1685,67              | 9,41             | 2430,00              |
| Stárnutý 1 h + 1 x reflow | 10,75            | 1650,83              | 9,57             | 2413,67              |
| Stárnutý 2 h              | 11,29            | 1624,67              | 10,41            | 2342,67              |
| Stárnutý 2 h + 1 x reflow | 12,19            | 1586,17              | 10,47            | 2336,67              |

Příklad výpočtu pro 1. sloupec tabulky 6.4:

$$V_{páj} = 0,83 \text{ mm}^3$$

$$\rho = \frac{2,04}{2} = 1,02 \text{ mm (změřeno)}$$

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

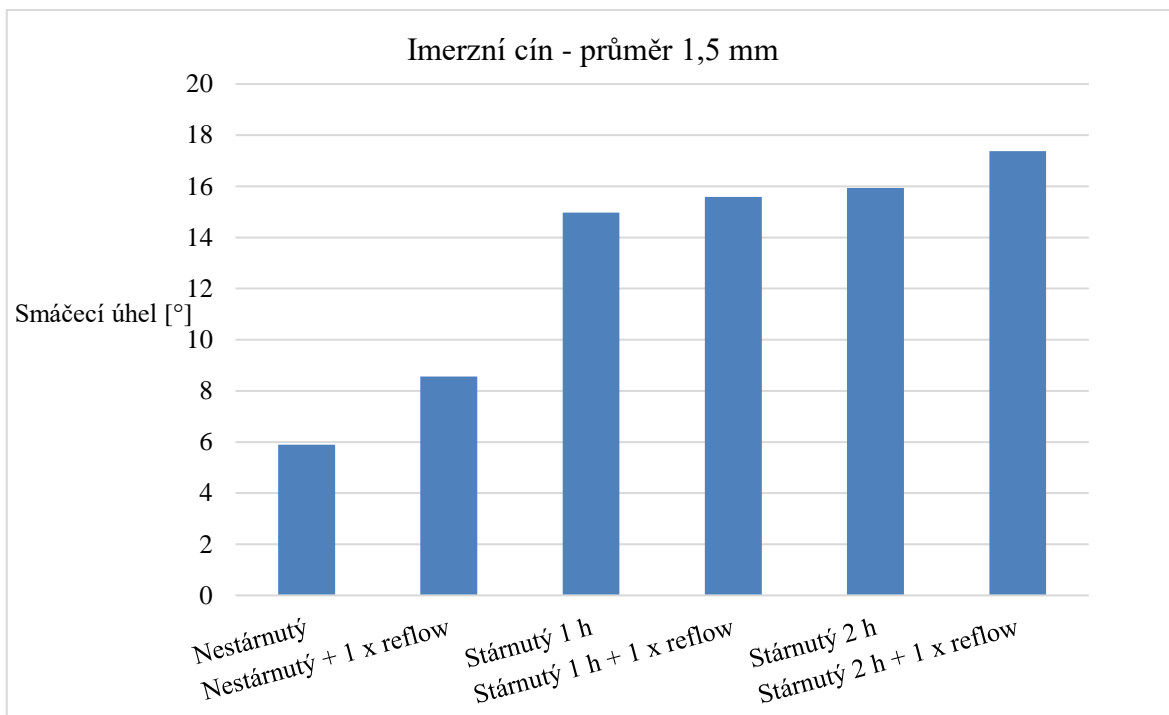
$$v^3 + 3 \cdot 1,02^2 v - \frac{6 \cdot 0,83}{\pi} = 0$$

$$v = 0,05 \text{ mm}$$

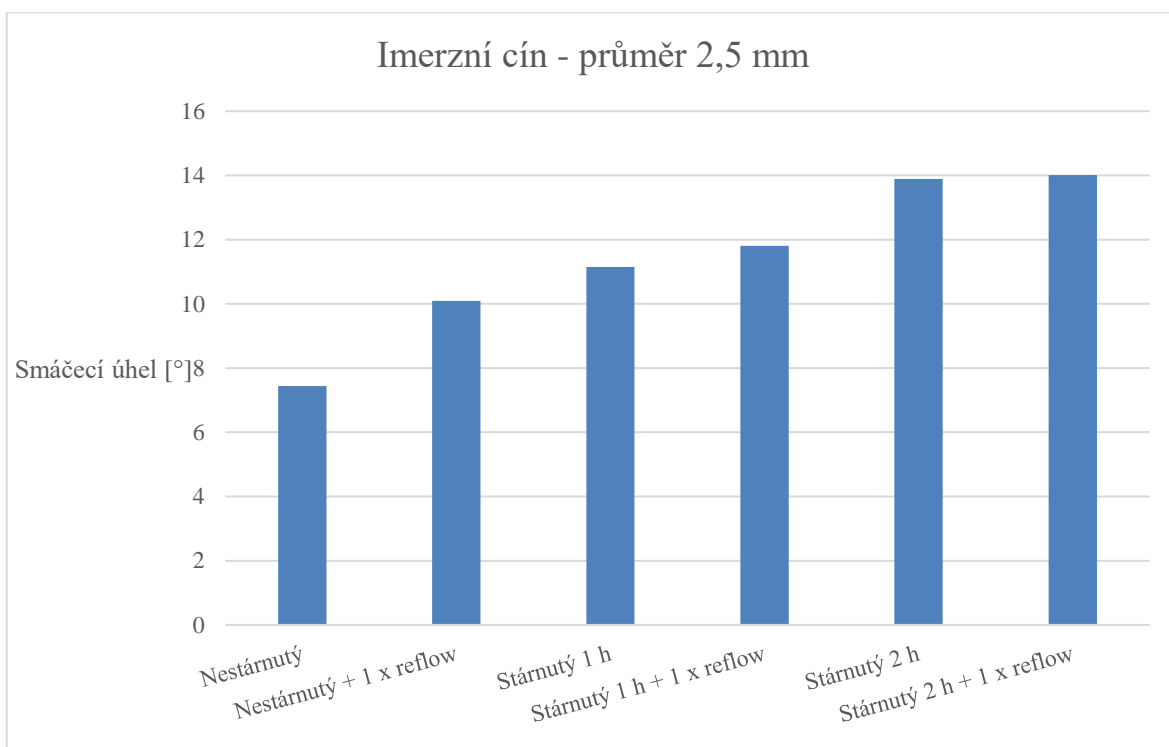
$$r = \frac{\rho^2 + v^2}{2v} = \frac{1,02^2 + 0,05^2}{2 \cdot 0,05} = 10,47 \text{ mm}$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\rho}{r} = \sin^{-1} \frac{1,02}{10,47} = 5,6^\circ$$

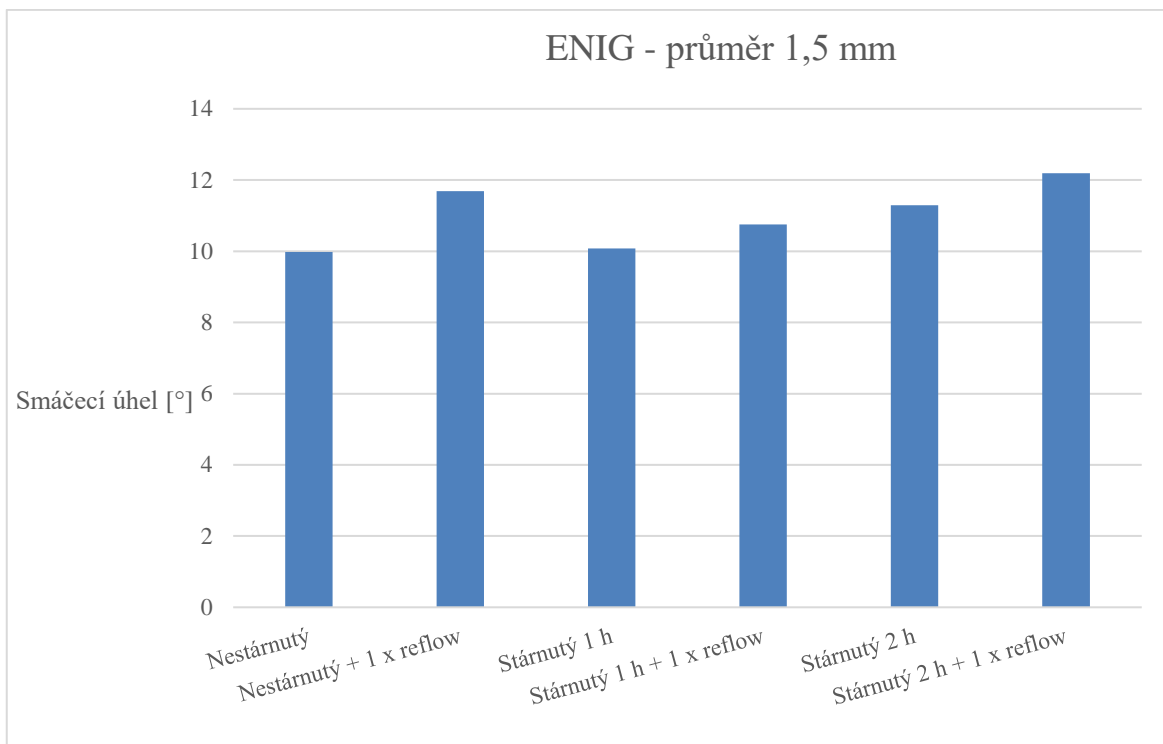
kde  $V_{páj}$  je objem pájky po přetavení pájecí pasty v  $\text{m}^3$ ,  $\rho$  je poloměr vrchlíku pájky v m,  $v$  představuje výšku vrchlíku pájky v m,  $r$  vyjadřuje poloměr koule, ze které je vrchlík tvořen v m a  $\theta$  označuje smáčecí úhel ve  $^\circ$ .



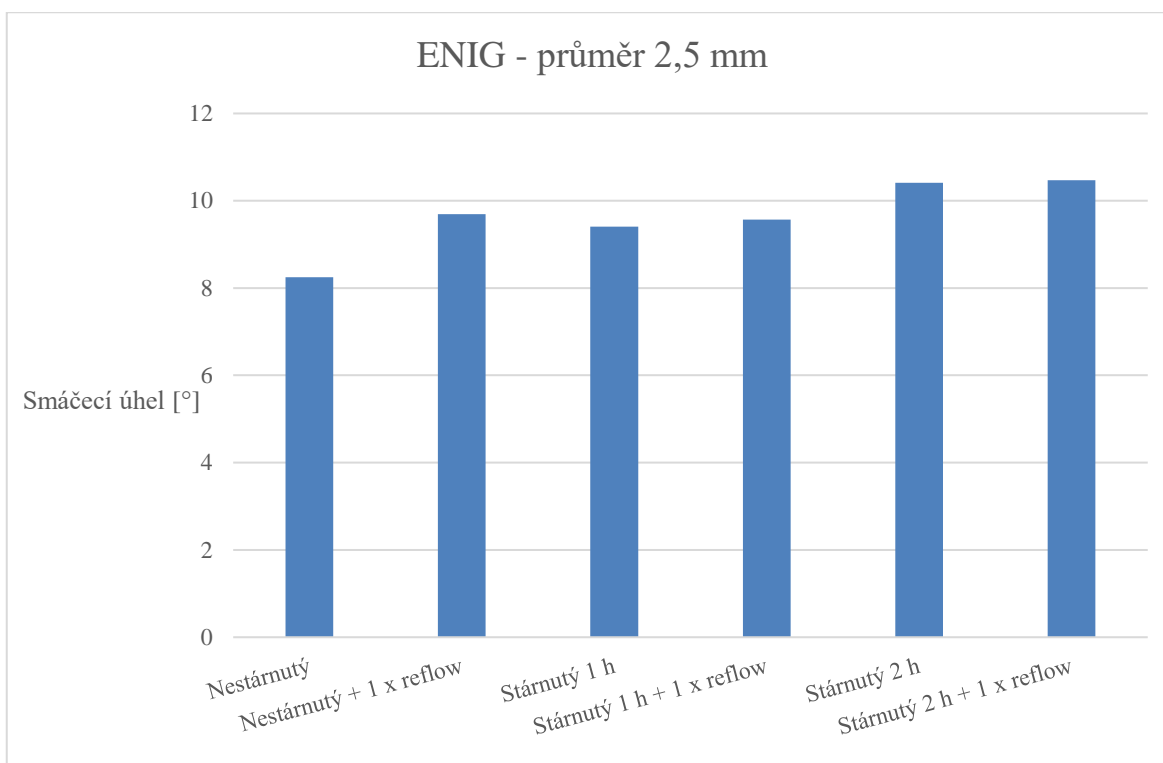
Obr 6.14 Smáčecí úhly pro imerzní cín se šablonou 1,5 mm



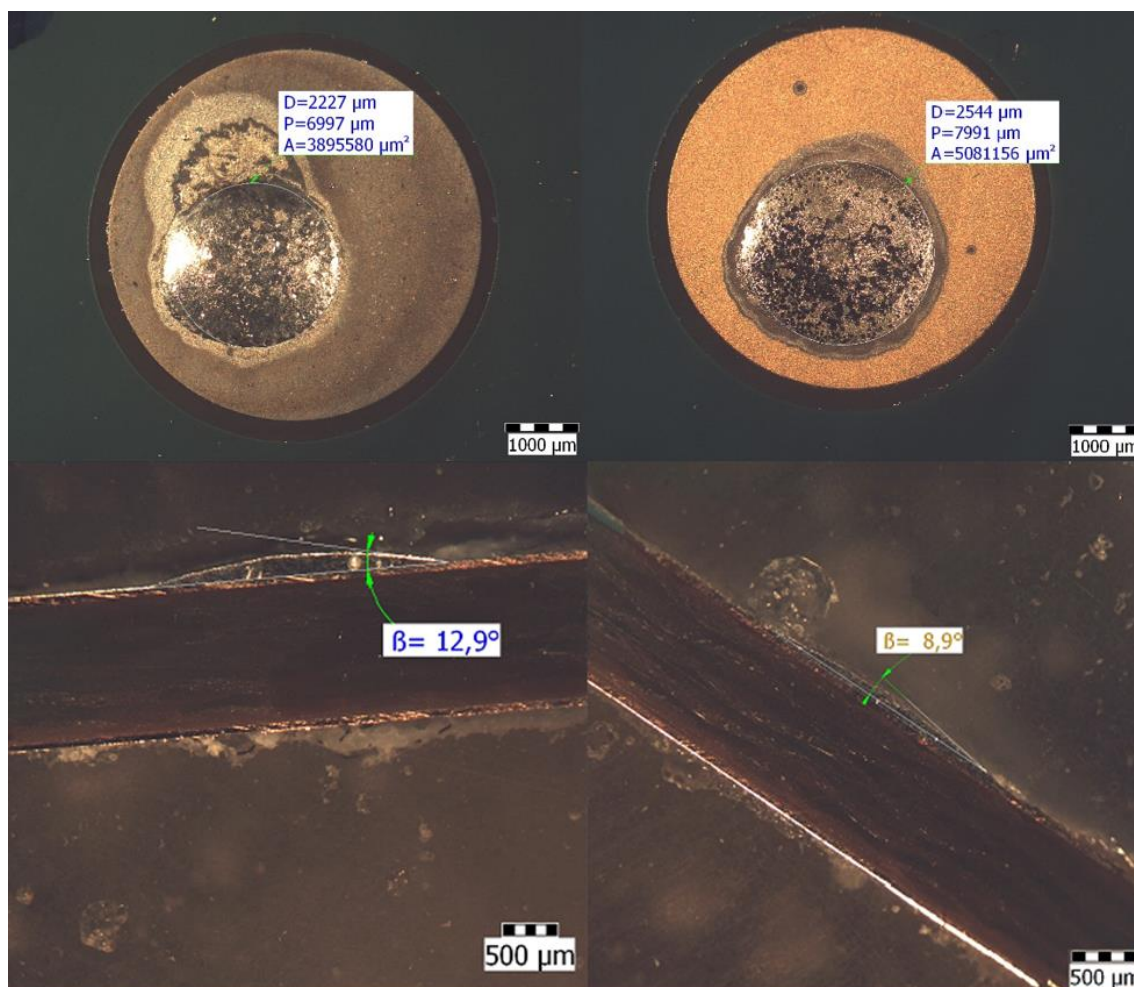
Obr 6.15 Smáčecí úhly pro imerzní cín se šablonou 2,5 mm



Obr 6.16 Smáčecí úhly pro ENIG se šablonou 1,5 mm



Obr 6.17 Smáčecí úhly pro ENIG se šablonou 2,5 mm



Obr 6.18 Měření smáčecího úhlu pomocí mikrovýbrusu

Pro kontrolu byl proveden u dvou vzorků kontrolní mikrovýbrus, a poté byl smáčecí úhel změřen pod optickým mikroskopem. Změřený smáčecí úhel byl porovnán s výsledky získanými pomocí výpočtu.

Porovnání změřeného úhlu pomocí mikrovýbrusu a výsledků získaných výpočtem je na obrázku 6.18 a v tabulce 6.6.

Tab 6.6 Změřené a vypočítané hodnoty pro kontrolní mikrovýbrus

|             | Průměr vrchlíku pájky [mm] | Smáčecí úhel [°] | Vypočítaný smáčecí úhel [°] |
|-------------|----------------------------|------------------|-----------------------------|
| ENIG        |                            |                  |                             |
| Nestárnutý  | 2,544                      | 8,90             | 8,13                        |
| Imerzní cín |                            |                  |                             |
| Stárnutý 2h | 2,227                      | 12,90            | 12,09                       |

Výsledné hodnocení je uvedeno v kapitole Diskuze výsledků.

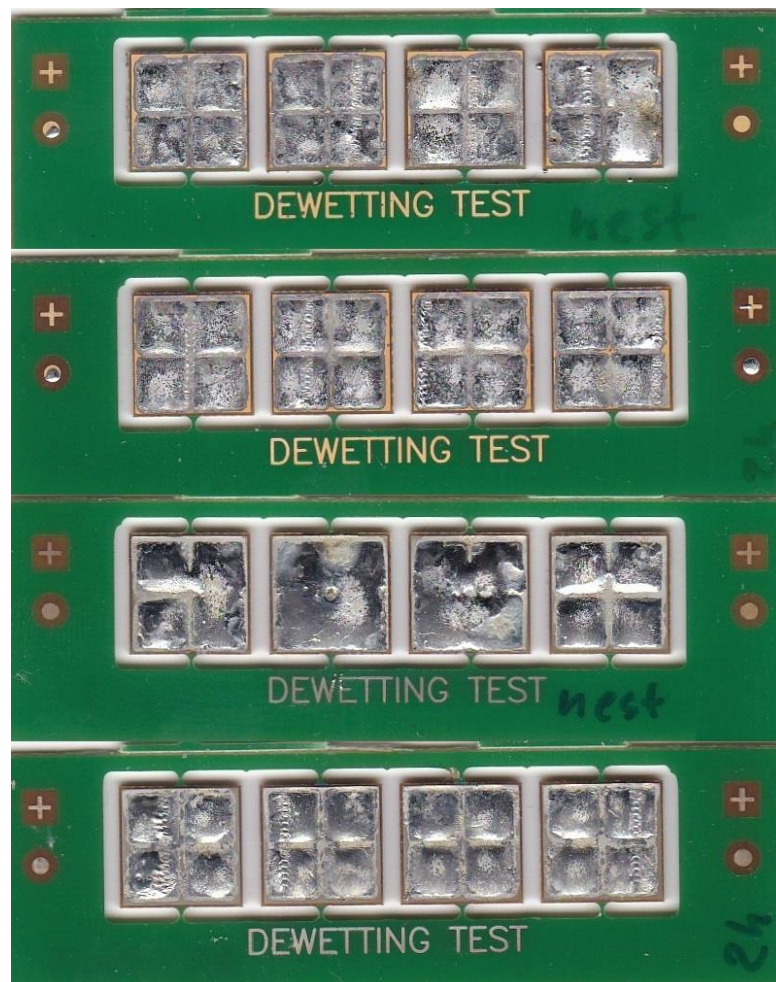


## 6.5 Dewetting test

Pro provedení dewetting testu byl použit pro každý zkoumaný případ jeden testovací kupón, který se skládá ze 4 pájecích plošek.

Na každou pájecí plošku se nanasla přes šablonu, o tloušťce 100  $\mu\text{m}$ , pájecí pasta SAC305. Poté vzorky prošly přetavovací pecí. Nakonec byly vzorky zkoumány pod optickým mikroskopem, kde se zjišťovalo jestli nedošlo k odsmáčení pájky z povrchu.

K testování docházelo opět u vzorků, které byly vystaveny izotermálnímu stárnutí, a také po průchodech vzorků přetavovací pecí. Po prvním provedení testu na kupónu byla pasta natisknuta z druhé strany, a test byl proveden znovu. Na obrázku 6.19 jsou ukázány příklady výsledků testu. Jsou na něm výsledky pro ENIG a imerzní cín, pro nestárnuté vzorky a pro vzorky po izotermálním stárnutí po dobu 2 hodin.



Obr 6.19 Výsledky dewetting testu

Tímto testem prošly všechny zkoumané vzorky. V žádném případě nedošlo k odsmáčení pájky z povrchu.

## 7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Vyhodnocován je vliv izotermálního stárnutí a vliv vícenásobného průchodu přetavovací pecí na smáčivost povrchových úprav imerzním cínem a technologií ENIG. Vyhodnocuje se 5 prováděných testů. Výsledky jsou porovnávány s požadavky norem, popřípadě s požadavky firmy Atotech, která používá podobné testy. Podle naměřených hodnot jsou určeny požadavky na kritéria úspěšnosti jednotlivých testů. Tyto kritéria by měly sloužit jako doporučení pro pravidelné testování realizované výrobní firmou. Veškeré změřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulkách a grafech v předchozí kapitole

### ➤ Wetting balance test

Vyhodnocování testovací metody wetting balance test probíhá podle normy IPC J-STD 003C. Norma udává několik požadavků, kterých by mělo být dosaženo. Tyto hodnoty jsou čas, kdy bylo dosaženo korigované nuly, síla, které bylo dosaženo po 2 a 5 sekundách a poměr smáčecí síly ku smáčivému obvodu vzorku ponořeného do pájky. Norma udává doporučení především pro povrchové úpravy imerzním cínem a ENEPIG, vzhledem k velké podobnosti mezi povrchovými úpravami ENEPIG a ENIG byly hodnoty srovnávány s kritérii udávanými pro technologii ENEPIG.

Kromě požadavků normy byl ještě kontrolován poměr  $F_2/t_{2/3}$  [mN/s], což je poměr mezi maximální smáčecí silou, které bylo dosaženo, vzhledem ke korigované nule, a mezi časem, kdy bylo dosaženo 2/3 této hodnoty. Tento poměr by měl být co největší, aby došlo k nejlepšímu smáčení. Pokud je tato hodnota záporná, znamená to, že smáčecí síla nedosáhla korigované nuly, tedy nebyla větší než síla vztlaková, a nedošlo tedy ke smáčení povrchu pájkou.

Vzorky byly měřeny po dodání, po izotermálním stárnutí po dobu 1 a 2 hodin při teplotě 155 °C. Pro každou z těchto možností byly dále změřeny vzorky po 1 a 2 průchodech přetavovací pecí s teplotním profilem pro bezolovnaté pájení.

Vzorky povrchové úpravy ENIG vykazovaly poměrně velkou stabilitu pro všechny provedené zkoušky. K příliš velkému zhoršení smáčecích charakteristik nedošlo ani u vzorků po izotermálním stárnutí po dobu 2 hodin a po 2 průchodech přetavovací pecí. Nejhoršího poměru  $F_2/t_{2/3}$  a to 0,162 mN/s bylo dosaženo u vzorků po izotermálním stárnutí 1 hodinu a jednom průchodu přetavovací pecí. Tento výsledek je horší než u vzorků, které byly vystaveny náročnějším podmínkám, což neodpovídá teoretickým předpokladům. Vzhledem k minimálním rozdílům výsledků měření oproti nestárnutým vzorkům, které byly maximálně 0,03 mN/s, je tento jev pravděpodobně způsoben pouze nepřesností měření nebo vnějšími vlivy. U stárnutých vzorků nedocházelo k velkému snížení maximální smáčecí síly, ale byla především prodloužena doba do smáčení, a to v průměru přibližně o 1 sekundu.

U povrchové úpravy ENIG tedy vlivem namáhání dochází především k prodloužení doby než dojde ke smáčení, zatímco u imerzního cínu dochází ke snížení maximální smáčecí síly, které je dosaženo. U všech vzorků ovšem došlo ke smáčení a to i u vzorků imerzního cínu, které byly vystaveny izotermálnímu stárnutí, po dobu 2 h, a prošly přetavovací pecí. Zde by měla být smáčivost ovlivněna nejvíc, což se potvrdilo, ale zhoršení nebylo nijak kritické. Zhoršení je způsobováno především oxidací povrchu vzorku a nárůstem intermetalické vrstvy na rozhraní cín-měď.

Požadavkům normy vyhovovala převážná většina testovaných vzorků. První kontrolovaná hodnota byl čas kdy bylo dosaženo korigované nuly. Této hodnoty by nestárnuté vzorky imerzního cínu měly dosáhnout před uplynutím času 2 s, u stárnutých vzorků by to mělo být do 3 s. Pro vzorky ENIGu jsou tyto hraniční hodnoty 1,5 s u nestárnutých vzorků a 2,5 s u stárnutých. Reálně u nestárnutého imerzního cínu byla zjištěna hodnota 1,54 s a u stárnutých vzorků se tato hodnota většinou pohybovala pod hranicí 2 s. Nejhuře, podle předpokladů, dopadly vzorky, které byly vystaveny izotermálnímu stárnutí 2 h a prošly 2x přetavovací pecí kde byl čas 2,36 s, což ovšem stále bez problému vyhovuje limitům udávaným normou. Nestárnutý ENIG dosáhl hodnoty 1,2 s a ostatní se pohybovaly v rozmezí od 2 do 2,5 s. Nejhorší výsledky vykázaly vzorky po 2 h izotermálního stárnutí a po průchodu přetavovací pecí, kde byla hodnota přesně 2,5 s, tedy přesně na limitu. Všechny měřené vzorky tedy tímto limitem prošly.

Dalším kontrolovaným kritériem byly změřené smáčecí síly v časech 2 a 5 s po začátku testu. Síla změřená po 2 s od začátku testu by měla dosahovat minimálně 25 % teoretické maximální smáčecí síly. Po 5 s od začátku měření by měla být změřena stejná nebo větší síla jako v čase 2 s. Maximální teoretická smáčecí síla byla vypočítána jako 6 mN, 25 % je tedy 1,5 mN. U obou povrchových úprav nebylo této hodnoty v čase 2 s dosaženo u žádných vzorků. V čase 5 s od začátku testu této hodnoty ovšem již dosahovaly všechny měřené vzorky s výjimkou vzorků imerzního cínu po 2 hodinách izotermálního stárnutí a po dvou průchodech přetavovací pecí, kde bylo dosaženo hodnoty 1,39 mN.

Posledním požadavkem který norma udává, je minimální smáčecí síla v poměru ku smáčivému obvodu vzorku. Pro nestárnuté vzorky by tento poměr měl být minimálně 0,19 mN/mm pro ENIG, a 0,15 mN/mm pro imerzní cín. U vzorků nestárnutého ENIGu byla naměřena hodnota 0,19 mN/mm, a u imerzního cínu 0,22 mN/mm, obě povrchové úpravy tedy vyhovují požadavkům normy. U stárnutých vzorků jsou normou udávány limity 0,17 mN/mm pro ENIG a 0,12 mN/mm pro imerzní cín. U stárnutých vzorků technologie ENIG byly hodnoty v rozmezí od 0,17 mN/mm do 0,18 mN/mm. V případě imerzního cínu vycházel poměr u stárnutých vzorků mezi 0,12 mN/mm a 0,19 mN/mm. Všechny měřené vzorky tedy vyhovovaly kritériím udávaným normou.

Měřené vzorky tedy prošly všemy kritérii, které norma udává, až na sílu, které je dosaženo po 2 sekundách od začátku měření. Po pěti sekundách již ale naměřená síla odpovídala požadavkům normy a i čas dosažení korigované nuly byl v pořádku. Nesplnění předchozích limitů by tedy nemělo být nijak kritické.

➤ Edge dip test

Stejně jako u wetting balance testu vycházelo vyhodnocení tohoto testu z požadavků normy IPC J-STD 003C. Tento test se nehodnotí podle naměřených hodnot, ale posuzuje se pouze výsledek vizuální kontrolou. Podle požadavků normy by mělo být 95 % ponořeného povrchu pokryto pájkou. Vyhodnocuje se, zda veškeré pady které jsou na vzorku, a které byly ponořeny do pájky, jsou pokryty pájkou a jestli na nich není viditelné odsmáčení.

Vzorky byly opět měřeny po dodání, po izotermálním stárnutí po dobu 1 a 2 hodin při teplotě 155 °C. Dále měření probíhalo po průchodech přetavovací peci s teplotním profilem pro bezolovnaté pájení.

Veškeré měřené vzorky nevykazovaly žádnou úroveň odsmáčení. Na každém testovaném vzorku byly pokryty mědí všechny pady. Testované vzorky tedy vyhovují požadavkům normy.

➤ Solder indicator

Metoda solder indicator je vyhodnocována podle kritérií udávaných firmou Atotech. Jako limit je uvedena hodnota 2 pro imerzní cín, pro povrchovou úpravu ENIG limit není uváděn.

Vzorky byly měřeny po dodání, po izotermálním stárnutí po dobu 1 a 2 hodin. Dále vzorky byly použity podruhé z opačné strany a test byl proveden znovu.

Nestárnuté vzorky imerzního cínu dosáhly hodnoty 10, což znamená, že se pájka roztekla po celém povrchu pájecích plošek. U stárnutých vzorků došlo k poměrně velkému zhoršení a hodnoty se pohybovaly lehce nad limitním dílkem 2.

U nestárnutých vzorků povrchové úpravy ENIG bylo dosaženo hodnoty 3, přičemž stárnuté vzorky nevykazovaly příliš velké zhoršení a výsledné hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 2,5 do 3.

Všechny měřené vzorky tedy prošly úspěšně nad limitem 2, ovšem výsledky nejsou příliš vypovídající, především u imerzního cínu došlo k prudkému zhoršení a poté se vzorky držely na téměř totožné úrovni.

Dále byly testovány různé šablony pro tisk pájecí pasty. Jednotlivé šablony se lišily ve velikosti otvorů pro tisk. Jejich velikost byla 2,0 mm, 2,1 mm a 2,2 mm. Výsledky ukázaly, že u šablon s otvory o velikosti 2,0 mm a 2,1 mm již ke stečení samotného sloupce pájky a výsledky tedy nebyly příliš použitelné. Pro testování byla tedy využita šablona o velikosti otvorů 2,2 mm.

➤ Solder spread test

Vyhodnocení solder spread testu probíhá pomocí měření průměru vrchlíku pájky po přetavení pájecí pasty a následném výpočtu smáčecího úhlu. Firma Atotech, která tento test vyvinula používá jako kritérium úspěšnosti smáčecí úhel menší než 30 °.

Testovány byly vzorky po dodání a dále po vystavení izotermálnímu stárnutí po dobu 1 a 2 hodin. Po každém testu byla z druhé strany kupónu natisknuta opět pájecí pasta a test byl proveden ještě jednou. Byl tedy sledován vliv vícenásobného průchodu přetavovací pecí. Na každém vzorku byly testovány dva různé průměry otvorů v šabloně na tisk pájecí pasty a to o průměru 1,5 mm a 2,5 mm.

U vzorků imerzního cínu pro průměr 1,5 mm se smáčecí úhel postupně s vystavením většímu tepelnému zatížení zvyšoval. Konkrétně se hodnoty pohybovaly od 5,89 ° pro nestárnuté vzorky až 17,38 ° pro vzorky po 2 h izotermálního stárnutí a dvou průchodech přetavovací pecí. Výsledky pro průměr 2,5 mm se smáčecí úhel pohyboval v rozmezí od 7,44 ° pro nestárnuté vzorky až do 14,01 ° pro vzorky po 2 h izotermálního stárnutí a dvou průchodech přetavovací pecí. Toto postupné zhoršování je způsobeno oxidací cínu na povrchu vzorku a nárůstem intermetalické vrstvy.

Vzorky s povrchovou úpravou ENIG vykazovaly u nestárnutých vzorků lehce větší smáčecí úhel. Oproti povrchové úpravě imerzním cínem ovšem byly mnohem stabilnější co se týče smáčivosti po tepelném namáhání. Smáčecí úhel se oproti původní hodnotě 9,98 °, pro průměr 1,5 mm, zvýšil pouze o 2 ° na 12,19 °. Pro průměr 2,5 mm byly výsledky podobné. Nestárnuté vzorky měly smáčecí úhel 8,25 ° a nejvyšší úhel pro stárnuté vzorky byl 10,47 °. U této povrchové úpravy se nezvyšoval smáčecí úhel podle předpokladů s vyšším teplotním namáháním. Vzhledem k minimálním rozdílům je to nejspíše způsobeno nepřesným odečítáním průměru vrchlíku pájky na optickém mikroskopu. Vyšší stabilita u ENIGu odpovídá teoretickým předpokladům, vzhledem k vyšší odolnosti proti oxidaci povrchu díky vrstvě zlata.

Kromě výpočtů smáčecího úhlu byl proveden také kontrolní mikrovýbrus, po kterém byl smáčecí úhel vybraných vzorků změřen pod optickým mikroskopem. Měření byly vzorky pro průměr 2,5 mm povrchové úpravy ENIG po dodání a dále povrchové úpravy imerzním cínem po izotermálním stárnutí po dobu 2 hodin. U obou vzorků byl měřený úhel téměř totožný s vypočítanými hodnotami. Maximální odchylka nebyla větší než 1 °.

Nejvyšší dosažený smáčecí úhel byl 17,38 ° pro stárnuté vzorky imerzního cínu. Všechny vzorky tedy prošly limitem udávaným firmou Atotech, a to s rezervou více než 10 °.

Tato metoda tedy vykazuje stejné výsledky jako wetting balance test. Vzorky ENIGu zpočátku mají horší smáčení než imerzní cín, ale vykazují větší stabilitu a jejich smáčecí úhel se téměř nemění. Vzorky imerzního cínu s větším tepelným zatížením vykázali postupné zhoršování.

➤ Dewetting test

Tento test se vyhodnocuje pouze vizuální metodou, kdy se kontroluje zda u vzorků nedošlo k odsmáčení povrchu.

Vzorky byly měřeny opět po dodání a po vystavení izotermálnímu stárnutí po dobu 1 a 2 h. Dále byly vzorky použity znovu z druhé strany, aby se zjistil vliv vícenásobného přetavení na smáčivost.

Všechny měřené vzorky obou povrchových úprav tímto testem prošly. Žádný z nich nevykazoval jakékoliv známky odsmáčení, a to ani po 2 h izotermálního stárnutí a průchodu přetavovací pecí. Tyto výsledky odpovídají také ostatním testům, jelikož ani u nich nebyly zjištěny žádné známky odsmáčení povrchu.

# ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala problematikou povrchových úprav plošných spojů, měřením jejich kvality, a možností jejich pravidelného testování. K tomuto účelu je využit testovací kupón vyvinutý ve spolupráci s firmou Gatema.

V teoretické části je nejprve probrána problematika různých povrchových úprav, pájecích slitin a pájitelnosti. Dále jsou uvedeny možné environmentální vlivy, které mohou mít vliv na výslednou kvalitu povrchových úprav.

Následující část práce již popisuje samotný testovací kupón a princip jednotlivých testovacích metod. Také se věnuje způsobu, kterými by bylo možné tyto metody testování vyhodnotit, aby bylo možné opakovaně používat těchto metod a byla možnost srovnání výsledků mezi sebou. Zároveň se zabývá porovnáním dosažených výsledků s kritérii udávanými normou IPC J-STD 002D a IPC J-STD 003C.

V praktické části byly měřeny vzorky povrchových úprav ENIG a imerzní cín. Každá povrchová úprava prošla sérií pěti testů. U testů se vyhodnocoval vliv izotermálního stárnutí a přetavovacích procesů na smáčivost desek s určitými povrchovými úpravami. První z testovacích metod byl wetting balance test. Zde se pomocí meniskografu měřily smáčecí charakteristiky při ponoření vzorku do pájky. Z naměřených charakteristik vyplývá, že u imerzního cínu po vyšším tepelném zatížení dochází ke snížení maximální smáčecí síly. U žádných vzorků ovšem nedošlo k takovému zhoršení, že by ke smáčení vůbec nedošlo. U vzorků ENIGu se po vyšším tepelném zatížení maximální smáčecí síla drží na téměř konstantní úrovni, ale dochází zde k prodloužení doby než ke smáčení dojde. Výsledky testů byly porovnány s požadavky normy. Požadavky splňovaly všechny měřené vzorky, s výjimkou jednoho požadavku, a to velikosti smáčecí síly po 2 sekundách od začátku testu. Po 5 sekundách měření již požadované smáčecí síly bylo dosaženo.

Dalším testem byl edge dip test. Zde se zjišťovalo zda při ponoření vzorku do pájky dojde k pokrytí všech padů, a zda nedojde k odsmáčení povrchu. Tímto testem prošly veškeré měřené vzorky.

Následující test byl solder indicator. Při tomto testu se sleduje spojování dvou sloupců natisknuté pájecí pasty po přetavení, přičemž rozestup mezi nimi se neustále zvětšuje. U tohoto testu by měl být limit dílek s označením 2. Tuto hranici všechny vzorky přesáhly, ovšem pohybovaly se většinou na její hranici. U imerzního cínu došlo k prudkému zhoršení při porovnání stárnutých a nestárnutých vzorků. Na nestárnutých vzorcích se pájka stekla po celé ploše, zatímco u stárnutých vzorků došlo ke stečení vždy u hranice 2. Tento test tedy nevykazoval příliš průkazné výsledky jelikož nedocházelo k postupné degradaci, ale zhoršení bylo jen oproti nestárnutým vzorkům, a dále byly výsledky víceméně neměnné.

Čtvrté měření probíhalo pomocí solder spread testu. Zde se sledovalo roztečení natisknuté pájecí pasty a podle změřeného průměru vrchlíku pájky se vypočítal smáčecí úhel. Imerzní cín po vyšší tepelné zátěži vykazoval postupné zvyšování smáčecího úhlu. Vzorky s povrchovou úpravou ENIG měly mnohem vyšší stabilitu a smáčecí úhel se téměř neměnil, maximálně na úrovni 2 °. Maximální smáčecí úhel byl naměřen u povrchové úpravy imerzním cínem a to 17 °. Tato hodnota ukazuje velmi dobré smáčení i po vystavení vzorků izotermálnímu stárnutí a po průchodech přetavovací pecí. Limit společnosti Atotech je udáván 30 °, což je vysoko nad výsledky kterých bylo dosaženo.

Poslední testování probíhalo pomocí metody dewetting test. Zde se vyhodnocovalo odsmáčení pájky z povrchu vzorků. U žádného ze vzorků nebyla zjištěna jakákoliv úroveň odsmáčení a tedy prošly úspěšně tímto testem.

Jednotlivé metody vykazují většinou stejné výsledky. Metody solder spread test a wetting balance test shodně ukázaly postupnou zhoršující smáčivost se zvyšujícím se tepelným zatížením u vzorků imerzního cínu. Stejně tak velkou stálost vzorků ENIGu, který sice u nestárnutých vzorků vykazuje horší smáčivost, ale vynahrazuje to svojí odolností při tepelném namáhání. Výsledky metody solder indicator byly lehce odlišné, jelikož u vzorků imerzního cínu nedocházelo k postupnému zhoršení, ale došlo zde k prudkému poklesu smáčivosti u stárnutých vzorků a dále již byly výsledky konstantní.

Metoda solder indicator příliš neodpovídá výsledkům ostatních testů. Vzhledem k nepřilíživým průkazným výsledkům metody solder indicator, a tedy složitému vyhodnocování, se tento test nedoporučuje při použití pro metodické testování ve výrobní firmě. Možným řešením nedostatků této metody může být provedení v ochranné dusíkové atmosféře jako jej provádí firma Atotech, popřípadě využití šablony o jiné tloušťce. Z ostatních testů by mělo být zjištěno dostatečné množství dat pro vyhodnocení kvality povrchových úprav. Metody edge dip test a dewetting test se vyhodnocují pouze vizuální kontrolou dle výše uvedených kritérií. Pro metodu solder spread test je vzhledem k výsledkům stanoven limit smáčecího úhlu na 25 °, což znamená stále velmi dobré smáčení. U metody wetting balance test se kontroluje nejvíc hodnot. Měl by být kontrolován čas kdy bylo dosaženo korigované nuly, maximální smáčecí síla v poměru ke smáčivému obvodu vzorku, a síla které bylo dosaženo v čase 5 sekund od začátku testu. Síla, které bylo dosaženo po 2 sekundách od začátku testu, by se nemusela kontrolovat. Rychlost smáčení by měla být dostatečně kontrolována pomocí času, kdy bylo dosaženo korigované nuly. Limity pro tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1, a korespondují s požadavky udávanými normou IPC J-STD 003C. Testování by mělo probíhat u vzorků po dodání a po izotermálním stárnutí při teplotě 155 °C a po průchodu přetavovací pecí.



# LITERATURA

- [1] STARÝ, J., KAHLE, P. *Plošné spoje a povrchová montáž* Elektronické skriptum Brno: FEKT VUT v Brně, 2003
- [2] PCB Surface Finishes – Implication on the SMT Process Yield [online] [cit 5. dubna 2018] Dostupné z [www:http://www.smta.org/chapters/files/SMTA\\_India\\_03\\_PCB\\_Surface\\_Finishes\\_Implication\\_on\\_the\\_SMT\\_Process\\_Yield\\_%28Liy-a-Indium%29.pdf](http://www.smta.org/chapters/files/SMTA_India_03_PCB_Surface_Finishes_Implication_on_the_SMT_Process_Yield_%28Liy-a-Indium%29.pdf)
- [3] IPC-4552. Specification for Electroless Nickel/Immersion Gold (ENIG)Plating for Printed Circuit Boards. Bannockburn, 2012. 26 p.
- [4] 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..
- [5] Suffering through reliability concerns & field failures due to ENIG [online] [cit 5. dubna 2018] Dostupné z [www : http://www.lilotree.com/ENIG-Premium](http://www.lilotree.com/ENIG-Premium)
- [6] Povrchové úpravy Saturn Chemický cín Ormecon [online] [cit 5. dubna 2018] Dostupné z [www: http://www.semach.cz/povrchy3.html](http://www.semach.cz/povrchy3.html)
- [7] Immersion Tin [online] [cit 5. dubna 2018] Dostupné z [www: http://www.atotech.com/products/electronics/final-finishing/immersion-tin.html](http://www.atotech.com/products/electronics/final-finishing/immersion-tin.html)
- [8] Rollback the Lead-Free Initiative [online] [cit 5. dubna 2018] Dostupné z [http://www.sigcon.com/Pubs/news/10\\_01.htm](http://www.sigcon.com/Pubs/news/10_01.htm)
- [9] IPC-4554. Specification for Immersion tin Plating for Printed Circuit Boards. Bannockburn, 2012. 42 p.
- [10] IPC-4556 Specification for Electroless Nickel/Electroless Palladium/Immersion Gold (ENEPIG) Plating for Printed Circuit Boards. Bannockburn 2012. 87 p.
- [11] BALLANTYNE, A., JONES, T., ENIPIG Surface Finishes for Electronics [ cit 5. dubna 2018] Dostupné z <http://www.macfest-project.co.uk/images/R2i%20poster%20MACFEST.pdf>
- [12] SZENDIUCH, I., HEJÁTKOVÁ, E., Mikroelektronika a technologie součástek Elektronické skriptum Brno: FEKT VUT v Brně, 2013
- [13] LABAJ R. Vliv smáčecích charakteristik na spolehlivost pájeného spoje Bakalářská práce Brno: FEKT VUT v Brně, 2010.
- [14] NESTROJIL, M.Vliv inertní atmosféry na smáčení povrchu u bezolovnatého pájení. Brno: VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 109 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D..

- [15] SZENDIUCH, I. Pájení a bezolovnaté pájky [online] [cit 5. dubna 2018] Dostupné na www: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [16] VÍDEŇSKÝ, O. 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.
- [17] JURÁK, K., NEJEZCHLEBOVÁ, Z. Zkoušení elektronických sestav, [online] [cit 5. dubna 2018] Dostupné na www:<http://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:19948- /nove-v-e-archivu-zkouseni-elektronickych-sestav-terminologie>
- [18] HARANT, P., STEINER, F., Testování pájitelnosti metodou smáčecích vah [online] [cit 5. dubna 2018] Dostupné z www: <https://dspace.zcu.cz/bitstream/handle/11025/392/r0c1c8.pdf?sequence=1>
- [19] STARÝ, J., ZATLOUKAL, M. Montážní a propojovací technologie Elektronické skriptum Brno: FEKT VUT v Brně, 2014
- [20] Metoda smáčecích vah [online] [cit 5. dubna 2018] Dostupné na www: <http://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/metoda-smacecich-vah/>
- [21] IPC J-STD-003C. Solderability Tests for Printed Boards. Bannockburn, 2014. 48 p.
- [22] IPC J-STD-002D. Solderability Tests for Component Leads, Terminations, Lugs, Terminals and Wires. Hemdon, 2013. 64 p.
- [23] LAMPRECHT, S., LEE, K., KAO, B., HEINZ, G., Wetting Behavior of Pb-free Solder on Immersion Tin Surface Finishes in Different Reflow Atmospheres [online] [cit 5. dubna 2018] Dostupné z www: <https://pdfs.semanticscholar.org/57c9/91e42d9c63eeb22092b4bb76c3440027ff81.pdf>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

|            |                                                |
|------------|------------------------------------------------|
| HAL        | Hot Air Leveling                               |
| ENIG       | Electroless Nickel Immersion Gold              |
| VOC        | Volatile Organic Compounds                     |
| $\theta$   | Smáčecí úhel                                   |
| $\gamma$   | Povrchové napětí                               |
| p          | Obvod vzorku                                   |
| g          | Gravitační zrychlení                           |
| $\rho$     | Hustota                                        |
| V          | Objem ponořené části vzorku                    |
| S          | Obsah plochy s povrchovou úpravou              |
| m          | Hmotnost                                       |
| $F_{vz}$   | 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 $F_{2/3}$            |
| $F_{teor}$ | Maximální teoretická smáčecí síla              |
| $V_{páj}$  | Objem pájky po přetavení                       |
| v          | Výška vrchlíku pájky                           |
| $\rho$     | Poloměr vrchlíku pájky                         |
| V          | Objem pájecí pasty po natisknutí               |
| r          | Poloměr otvoru šablony                         |
| tl         | Tloušťka šablony                               |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr 1.1 Technologie HAL .....                                                  | 10 |
| Obr 1.2 Black pad .....                                                        | 11 |
| Obr 1.3 Cínové whiskery .....                                                  | 13 |
| Obr 2.1 Srovnání spoje s pájkou SAC305(vlevo) a SnPb36Ag2 .....                | 15 |
| Obr 3.1 Smáčení povrchu pájkou .....                                           | 18 |
| Obr 4.1 Intermetalické vrstvy při pájení .....                                 | 21 |
| Obr 5.1 Testovací kupón s povrchovou úpravou ENIG .....                        | 22 |
| Obr 5.2 Původní testovací kupón firmy Atotech .....                            | 22 |
| Obr 5.3 Schéma meniskografu.....                                               | 23 |
| Obr 5.4 Průběh měření metodou smáčecích vah .....                              | 24 |
| Obr 5.5 Různé průběhy smáčení.....                                             | 25 |
| Obr 5.6 Síla $F_{2/3}$ v čase $t_{2/3}$ .....                                  | 25 |
| Obr 5.7 Smáčecí křivka .....                                                   | 27 |
| Obr 5.8 Vzorky pro edge dip test.....                                          | 29 |
| Obr 5.9 Návrh metody solder indicator od firmy Atotech.....                    | 30 |
| Obr 5.10 Šablona pro metodu solder indicator .....                             | 31 |
| Obr 5.11 Výsledky metody solder indicator .....                                | 31 |
| Obr 5.12 Grafické zobrazení smáčecího úhlu.....                                | 33 |
| Obr 5.13 Testovací kupóny pro solder spread test.....                          | 34 |
| Obr 5.14 Výsledky metody dewetting test.....                                   | 35 |
| Obr 5.15 Teplotní profil při pájení kondukci.....                              | 36 |
| Obr 5.16 Topné hnízdo THS 500.....                                             | 36 |
| Obr 5.17 Teplotní profil pro testy solder indicator a solder spread test ..... | 37 |
| Obr 5.18 Teplotní profil pro dewetting test .....                              | 37 |
| Obr 6.1 Měřicí pracoviště s meniskografem.....                                 | 41 |
| Obr 6.2 Smáčecí charakteristiky pro nestárnutý imerzní cín.....                | 42 |
| Obr 6.3 Smáčecí charakteristiky pro imerzní cín stárnutý 1 h.....              | 42 |
| Obr 6.4 Smáčecí charakteristiky pro imerzní cín stárnutý 2 h.....              | 43 |

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr 6.5 Smáčecí charakteristiky pro nestárnutý ENIG .....                               | 43 |
| Obr 6.6 Smáčecí charakteristiky pro ENIG stárnutý 1 h .....                             | 44 |
| Obr 6.7 Smáčecí charakteristiky pro ENIG stárnutý 2 h .....                             | 44 |
| Obr 6.8 Vzorky pro edge dip test (nahore imerzní cín, dole ENIG).....                   | 48 |
| Obr 6.9 Vyhodnocení testu solder indicator (imerzní cín – nestárnutý, stárnutý 2 h).... | 49 |
| Obr 6.10 Výsledky solder indicatoru pro různé šablony (zhora 2,2; 2,1 a 2,0 mm).....    | 50 |
| Obr 6.11 Šablona 2,2 mm .....                                                           | 51 |
| Obr 6.12 Šablona 2,0 mm .....                                                           | 51 |
| Obr 6.13 Solder spread test (zleva imerzní cín 2 h + 2x reflow, ENIG nestárnutý).....   | 52 |
| Obr 6.14 Smáčecí úhly pro imerzní cín se šablonou 1,5 mm .....                          | 54 |
| Obr 6.15 Smáčecí úhly pro imerzní cín se šablonou 2,5 mm .....                          | 54 |
| Obr 6.16 Smáčecí úhly pro ENIG se šablonou 1,5 mm.....                                  | 55 |
| Obr 6.17 Smáčecí úhly pro ENIG se šablonou 2,5 mm.....                                  | 55 |
| Obr 6.18 Měření smáčecího úhlu pomocí mikrovýbrusu .....                                | 56 |
| Obr 6.19 Výsledky dewetting tesu.....                                                   | 57 |

## SEZNAM TABULEK

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab 5.1 Doporučené hodnoty pro zkoušky při použití pájky SAC305.....              | 26 |
| Tab 5.2 Doporučené hodnoty pro zkoušky při použití pájky Sn63Pb37 .....           | 27 |
| Tab 5.3 Doporučené hodnoty pro ostatní povrchové úpravy.....                      | 28 |
| Tab 5.4 Nejmenší smáček úhel pro vzdálenosti mezi otvory v šabloně .....          | 32 |
| Tab 5.5 Smáček úhly pro průměry vrchlíku pájky (šablona 100 $\mu\text{m}$ ) ..... | 34 |
| Tab 5.6 Smáček úhly pro průměry vrchlíku pájky (šablona 150 $\mu\text{m}$ ) ..... | 34 |
| Tab 6.1 Naměřené a vypočítané hodnoty pro imerzní cín.....                        | 46 |
| Tab 6.2 Naměřené a vypočítané hodnoty pro ENIG .....                              | 46 |
| Tab 6.3 Naměřené hodnoty metodou solder indicator.....                            | 49 |
| Tab 6.4 Tabulka vypočítaných smáček úhlů pro imerzní cín .....                    | 52 |
| Tab 6.5 Tabulka vypočítaných smáček úhlů pro ENIG .....                           | 53 |
| Tab 6.6 Změřené a vypočítané hodnoty pro kontrolní mikrovýbrus .....              | 56 |