



# 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

## VÝZKUM SPOLEHLIVOSTI KULOVÝCH PÁJENÝCH VÝVODŮ U BGA POUZDER VYTVOŘENÝCH INOVATIVNÍ METODOU

RESEARCH OF RELIABILITY OF SOLDER BALL TERMINALS ON BGA PACKAGES ATTACHED BY INNOVATIVE METHOD

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Gregor

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

BRNO 2022

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Bc. Adam Gregor

**ID:** 203225

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Výzkum spolehlivosti kulových pájených vývodů u BGA pouzder vytvořených inovativní metodou

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Vypracujte rešerši založenou na vědeckých publikacích se zaměřením na izotermické a teplotní cyklické stárnutí pájených vývodů/spojů u BGA pouzder se zaměřením na vnitřní strukturu a popište ji. Začněte s teplotním cyklováním připravených vzorků s parametry vhodnými pro větší rozsah teplot než je určen pro spotřební elektroniku. Proveďte měření intermetalické vrstvy z pohledu tloušťky a drsnosti pro teplotně cyklované vzorky. U obou sad vzorků, tedy izotermicky stárnutých a teplotně cyklovaných analyzujte počet krystalografických rovin. Vyhodnoťte a porovnejte dosažené výsledky s výsledky vědeckých publikací.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle doporučení vedoucího práce.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 25.5.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**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 zkoumáním spolehlivosti a životnosti pájkových kulových vývodů na pouzdech BGA vytvořených novou metodou pomocí přímo vyhřívané šablony. Byla navržena metodologie spolehlivostních zkoušek pomocí izotermického a cyklického stárnutí pájkových kulových vývodů. Touto novou metodou přetavení pájkových kulových vývodů byly vytvořeny a následně statisticky vyhodnoceny testovací vzorky pouzder BGA. Zkoumána byla i vnitřní struktura a krystalografická orientace rovin.

## **Klíčová slova**

Pájkové kulové vývody, izotermické stárnutí, cyklické teplotní stárnutí, spolehlivost, BGA pouzdro, vnitřní struktura

## **Abstract**

This master's thesis deals with the investigation of the reliability and service life of solder bumps on BGA packages created using new method using directly heated stencil. The methodology of reliability tests using isothermal and cyclic thermal aging of solder ball terminals was proposed. Test samples of BGA packages were created using this new method of reflow solder bumps and then was statistically evaluated. The internal structure and crystallographic orientation of the planes were investigated.

## **Keywords**

Solder bumps, isothermal aging, cyclic thermal aging, reliability, BGA package, internal structure

## **Bibliografická citace**

GREGOR, Adam. *Výzkum spolehlivosti kulových pájených vývodů u BGA pouzder vytvořených inovativní metodou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2022. 47 s., Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Adam Gregor*

**VUT ID studenta:** *203225*

**Typ práce:** *Diplomová práce*

**Akademický rok:** *2021/22*

**Téma závěrečné práce:** *Výzkum spolehlivosti kulových pájených vývodů u BGA pouzder vytvořených inovativní metodou*

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne 24. května 2022

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Alexandru Otáhalovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce. Také děkuji firmě NeVo GmbH za poskytnutí pájecích materiálů (pájkové kuličky a tavidlo).

V Brně dne 24. května 2022

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	8
SEZNAM GRAFŮ .....	9
ÚVOD .....	10
<b>1. SPOLEHLIVOST A ŽIVOTNOST PÁJENÉHO SPOJE .....</b>	<b>11</b>
1.1 FYZIKÁLNÍ PROCESY .....	11
1.2 VNITŘNÍ STRUKTURA BGA PÁJENÝCH SPOJŮ .....	11
<b>2. TESTOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI PÁJENÝCH SPOJŮ .....</b>	<b>14</b>
2.1 IZOTERMICKÉ STÁRNUTÍ.....	14
2.2 CYKlickÉ STÁRNUTÍ.....	15
2.3 TESTOVÁNÍ JAKOSTI KULOVÝCH PÁJENÝCH VÝVODŮ U BGA POUZDER .....	16
<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>17</b>
3.1 NÁVRH EXPERIMENTU .....	17
3.2 PŘETA VENÍ PÁJKOVÝCH KULOVÝCH VÝVODŮ NA POUZDRECH BGA.....	18
3.3 PŘETA VENÍ TESTOVACÍCH POUZDER BGA A TESTOVACÍ DPS.....	20
<b>4. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI .....</b>	<b>25</b>
4.1 IZOTERMICKÉ STÁRNUTÍ A V LIV NA TLOUŠŤKU INTERMETALICKÉ VRSTVY A JEJÍ DR SNOST.....	25
4.1.1 <i>Analýza intermetalických vrstev</i> .....	26
4.1.2 <i>Výsledky a vyhodnocení</i> .....	27
4.2 IZOTERMICKÉ STÁRNUTÍ A V LIV NA POČET A ORIENTACI KRYSTALOGRAFICKÝCH ROVIN .....	29
4.3 CYKlickÉ STÁRNUTÍ A V LIV NA SPOLEHLIVOST PÁJENÉHO SPOJE .....	31
4.4 CYKlickÉ STÁRNUTÍ A V LIV NA TLOUŠŤKU INTERMETALICKÉ VRSTVY A JEJÍ DR SNOST .....	38
4.4.1 <i>Analýza intermetalických vrstev</i> .....	38
4.4.2 <i>Výsledky a vyhodnocení</i> .....	39
4.5 CYKlickÉ STÁRNUTÍ A V LIV NA POČET A ORIENTACI KRYSTALOGRAFICKÝCH ROVIN .....	42
<b>5. ZÁVĚR.....</b>	<b>44</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>46</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Typy morfologického uspořádání zrn cínu v kulových pájkových spojích [9] .....	12
Obrázek 2: Morfologická struktura cínových dendritů <i>Beach Ball</i> a struktura prokládaná [9] .....	13
Obrázek 3: Teplotní a sušicí komora Memmert UF75 [3] .....	15
Obrázek 4: Klimatická teplotní komora CTS-T-40/25 [5] .....	15
Obrázek 5: Motiv <i>Daisy Chain</i> na zkušebním testovacím pouzdře BGA a testovací DPS [7] .....	16
Obrázek 6: Nastavený teplotní profil pro cyklické testování vzorků .....	18
Obrázek 7: Přímou vyhřívání šablona upevněná na svorkách zařízení HSR-01 .....	19
Obrázek 8: Teplotní profil vyhřívání šablony tloušťky 300 µm .....	20
Obrázek 9: Nastavovaný teplotní profil [15] .....	20
Obrázek 10: Testovací DPS s motivem <i>Daisy Chain</i> .....	21
Obrázek 11: Detail testovací DPS po nanesení tavidla .....	21
Obrázek 12: Před sesouhlasením testovacího BGA pouzdra a testovací DPS .....	22
Obrázek 13: Po sesouhlasení testovacího BGA pouzdra a testovací DPS .....	22
Obrázek 14: Záběr po osazení testovacího BGA pouzdra a testovací DPS .....	23
Obrázek 15: Testovací DPS s uchycenými termočlánky z horní i spodní strany .....	23
Obrázek 16: Teplotní profil při pájení v horkovzdušné peci .....	24
Obrázek 17: Vzorky zapájených BGA pouzder po zalití Dentacrylem .....	25
Obrázek 18: Metalografický výbrus BGA kuliček po leštění vzorku roztokem oxidu hlinitého .....	26
Obrázek 19: Oblast intermetalického rozhraní vzorku po izotermickém stárnutí pořízená mikroskopem se zvětšením 1000x .....	27
Obrázek 20: Ořezaná část intermetalické vrstvy po izotermickém stárnutí vzorku pomocí programu ImageJ .....	27
Obrázek 21: Ořezaná a narovnaná část intermetalické vrstvy po izotermickém stárnutí vzorku pomocí programu ImageJ .....	27
Obrázek 22: Leštění vzorků pomocí diamantových past .....	30
Obrázek 23: Částečně prokládaná morfologie zrn cínu kulového pájkového spoje pořízená optickým mikroskopem se zvětšením 200x .....	30
Obrázek 24: Prokládaná morfologie zrn cínu kulového pájkového spoje pořízená optickým mikroskopem se zvětšením 200x .....	31
Obrázek 25: Rentgenová inspekce zapájeného BGA pouzdra 1 na zkušební DPS s identifikací nevodivého spoje (označeno červeně) .....	32
Obrázek 26: Rentgenová inspekce zapájeného BGA pouzdra 2 na zkušební DPS s identifikací nevodivého spoje (označeno červeně) .....	32
Obrázek 27: Testovací DPS v cyklovací komoře před teplotním cyklickým stárnutím .....	33
Obrázek 28: Hlavní deska zobrazující stav elektrické vodivosti jednotlivých spojů před cyklickým stárnutím vzorků .....	33
Obrázek 29: Hlavní deska zobrazující stav elektrické vodivosti jednotlivých spojů po cyklickém stárnutí vzorků .....	34
Obrázek 30: Testovací DPS v cyklovací komoře po teplotním cyklickém stárnutí 5000 cyklů .....	35
Obrázek 31: Detail testovací DPS po teplotním cyklickém stárnutí 5000 cyklů .....	35
Obrázek 32: Detailní zobrazení testu elektrické vodivosti mezi pájecí ploškou a odkrytou vodivou cestou .....	36
Obrázek 33: Oblast intermetalického rozhraní vzorku po cyklickém stárnutí pořízená mikroskopem se zvětšením 1000x .....	39
Obrázek 34: Vícezrnná struktura kulového pájkového spoje pořízená optickým mikroskopem se zvětšením 200x .....	42



Obrázek 35: Částečně prokládaná morfologie zrn cínu kulového pájkového spoje pořízená optickým mikroskopem se zvětšením 200x.....	43
---	----

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Statistické srovnání tloušťky intermetalické vrstvy u izotermicky nestárnutého a stárnutého vzorku.....	28
Graf 2: Statistické srovnání efektivní drsnosti intermetalické vrstvy u izotermicky nestárnutého a stárnutého vzorku .....	29
Graf 3: Nespolehlivost všech pájených spojů v závislosti na počtu cyklických cyklů .....	37
Graf 4: Nespolehlivost pájkových kulových vývodů v závislosti na počtu cyklických cyklů .....	37
Graf 5: Statistické srovnání tloušťky intermetalické vrstvy u cyklicky nestárnutého a stárnutého vzorku	40
Graf 6: Statistické vyhodnocení tloušťky intermetalické vrstvy u cyklicky stárnutého vzorku.....	40
Graf 7: Statistické srovnání efektivní drsnosti intermetalické vrstvy u cyklicky nestárnutého a stárnutého vzorku.....	41
Graf 8: Statistické vyhodnocení efektivní drsnosti intermetalické vrstvy u cyklicky stárnutého vzorku ...	41

# ÚVOD

Pájení pouzder BGA je již nedílnou součástí složitějších desek plošných spojů. Častější použití těchto pouzder přináší také větší potřebu volby vhodné pájecí metody a přesné nastavení teplotního profilu. Důvodem je komplikovanější dosažení požadované jakosti a spolehlivosti pájeného spoje. Při běžném životním cyklu pouzder typu BGA dochází k častějšímu vzniku defektů právě v pájených spojích kulového tvaru. S tím také souvisí zvýšený počet defektů a následných oprav. Proces vytvoření pájkových kulových vývodů a jejich opravy je tedy třeba dále do jisté míry zdokonalovat. Použití nových metod se stávajícími ověřenými postupy a znalostmi by mohlo vést ke kvalitnějšímu a spolehlivějšímu procesu výroby i následných oprav.

Správně nastavený proces pájení a požadované technologické kroky v souvislosti s používáním bezolovnatých pájecích slitin v současnosti vyžaduje přesnější nastavení teplotních parametrů během pájení. Teplotní zatížení součástek a jejich vývodů za použití bezolovnatých pájek roste, a to má za následek také rychlost růstu intermetalických vrstev. Přílišná tloušťka intermetalických vrstev snižuje mechanickou pevnost spoje a také elektrické parametry. Novou a inovativní metodou vytvoření, resp. znovuvytvoření pájkových kulových vývodů je použití nerezové šablony přímo vyhřívané elektrickým proudem.

Proces vytvoření pájkových kulových vývodů za použití nové metody pomocí přímo vyhřívané šablony, která je součástí inovativního zařízení HSR-01, se zdá být spolehlivá. Tuto spolehlivost resp. spolehlivost pájkových kulových vývodů je však nutno ověřit pomocí životnostních zkoušek.

V experimentální části diplomové práce byly podrobeny vzorky izotermickému stárnutí při teplotě 125 °C po dobu 350 h a došlo k jejich vyhodnocení. Nejprve bylo provedeno nastavení metodologie pro zjištění životnosti pájených spojů u BGA pouzder a vnitřní struktury těchto pájených spojů. Zhotovení zkušebních testovacích vzorků BGA pouzder bylo provedeno pomocí inovativního zařízení HSR-01 s následným statistickým vyhodnocením průměrné tloušťky intermetalické vrstvy  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Vzorky BGA pouzder byly osazeny a zapájeny k testovacím DPS, obsahují *Daisy Chain* motiv, který slouží k možnosti testování elektricky vodivého propojení.

V další experimentální části byly podrobeny vzorky cyklickým teplotním zkouškám s definovaným teplotním profilem od - 20 °C do 125 °C. Analyzovány byly kulové pájkové vývody z pohledu tloušťky intermetalické vrstvy se související spolehlivostí jakosti všech pájených spojů v závislosti na počtu provedených teplotně cyklických testů.

Předmětem zkoumání byla i vnitřní struktura pájkových kulových vývodů a orientace rovin. Práce obsahuje nové poznatky z oblasti vytváření pájkových kulových vývodů ve snaze zachování požadované spolehlivosti a jakosti.

# 1. SPOLEHLIVOST A ŽIVOTNOST PÁJENÉHO SPOJE

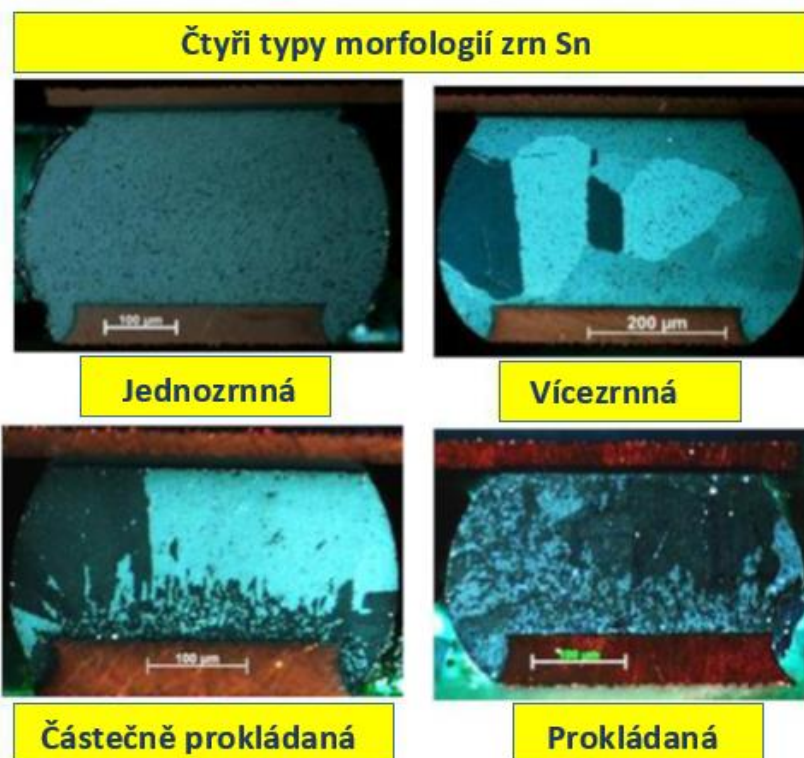
Životnost výrobků úzce souvisí s životnostmi pájených spojů. Pod pojmem životnost pájených spojů si můžeme představit dobu, po které již pájený spoj neplní svou funkci a dochází k nejrůznějším závadám na samotných výrobcích. Životnosti se zpravidla u většiny výrobků resp. pájených spojů zjišťují pomocí tzv. zrychlených zkoušek z důvodu časové a finanční náročnosti. Pomocí zrychlených zkoušek se simuluje pracovní režim za zvýšené teploty, resp. se zde střídají oblasti teplot od záporných po kladné. Tento proces rovněž simuluje vnitřní jevy a urychluje stárnutí, pájené spoje a součástky postupně degradují. [1]

## 1.1 Fyzikální procesy

Jedná se především o procesy fyzikální difúze a korozivních a elektrochemických změn. Difúzí materiálů dochází ke vzniku intermetalických sloučenin, které postupem času a teploty narůstají. Tyto vrstvy mohou postupem času vykazovat zhoršenou elektrickou vodivost, která může vést až k nefunkčnosti daného pájeného spoje. Při elektrochemické korozi dochází ke změnám vlastností materiálů spojů. Jedná se zejména o narušení homogenity a zhoršení adheze a tento fakt vede rovněž k jeho nespolehlivosti a celkovému zhoršení elektrických vlastností. [1]

## 1.2 Vnitřní struktura BGA pájených spojů

Důležitým faktorem pro spolehlivost a jakost BGA pájených spojů i pájených spojů obecně je jejich vnitřní struktura. Dílčími vlastnostmi jsou velikosti, tvary a uskupení krystalů a rovněž jejich orientace. Zásadní vliv na vnitřní strukturu pájených spojů má nastavovaný teplotní profil a jeho parametry. Lze říci, že velikosti a tvary krystalů lze ovlivňovat těmito parametry. Jedná se o nastavení doby nad teplotou tavení, maximální teplotou při přetavování. Zásadní vliv má rychlost chlazení, kde dochází ke chladnutí spojů a jejich konečnému utváření. Vnitřní struktura se zkoumá pomocí provedených metalografických výbrusů. Krystalografické orientace se z makroskopického pohledu dělí do čtyř základních a to podle uspořádání jednotlivých morfologií zrn. Rozdělení těchto čtyř krystalografických orientací je uvedeno na obrázku 1. Prvním typem je morfologická struktura jednozrná, druhým typem je vícezrná. Dalšími strukturami jsou částečně prokládaná a prokládaná struktura. U částečně prokládané struktury musí být zastoupení struktury v rozmezí nejméně 10 % a nejvíce pak 50 % z celkové plochy zkoumaného pájeného spoje. [6, 9]



Obrázek 1: Typy morfologického uspořádání zrn cínu v kulových pájkových spojích [9]

Pokud je zkoumána životnost resp. jakost spojů tepelným stárnutím např. izotermickým, v krystalografických strukturách dochází ke změnám morfologické struktury. Toto tvrzení potvrzuje publikace [10], která se zabývá vlivem izotermického stárnutí na procesech změn ve vnitřních strukturách pájeného spoje a zkoumá procentní poměry změn zastoupení mezi jednozrnou a vícezrnou strukturou u pájkových kulových vývodů BGA pouzder. Testovanou pájecí slitinou je SAC105 a další slitiny, jejich základ tvoří právě slitina SAC105 a příměsi D1 a D2. Tyto slitiny nesou označení SACD1 a SACD2. Stárnutí pájkových kulových vývodů BGA pouzdra, které bylo připájeno na testovací DPS, probíhalo za teploty 125 °C po dobu 250 hodin. Z publikace vyplývá, že po teplotním stárnutí se zvětšilo procentuální zastoupení vícezrné struktury u všech zkoumaných slitin a to konkrétně o 7,8 % u SAC105 pájecí slitiny. U slitiny s příměsí D1 došlo ke změně o 3,1 %, u příměsí D2 poté o 15,6 %. [10]

Za nejvhodnější makroskopickou morfologii při uspořádání krystalů se považuje u slitin SAC prokládaná a vícezrná struktura. U vícezrné struktury hovoříme o *Beach Ball* uspořádání jednotlivých zrn cínových dendritů. K rozdílům vícezrné struktury a struktury *Beach Ball* se řadí uspořádanější morfologie cínových dendritů, která má počátek kolem středu pájkového kulového vývodu a podobá se právě zmiňovanému motivu plážového míče viz obrázek 2. [8]

Při zaměření se na odolnost jednotlivých morfologických struktur při testech spolehlivosti lze říci, že prokládaná struktura má větší termomechanickou odolnost, než dosahuje struktura *Beach Ball*. Z pohledu mechanické pevnosti je výhodnější

pravidelnější vícezrnné uspořádání. Nejméně spolehlivou morfológickou strukturou, co se týká vlastností a odolnosti vůči termomechanickému namáhání, má struktura jednozrnná oproti vícezrnné struktuře. [8]



Obrázek 2: Morfológická struktura cínových dendritů *Beach Ball* a struktura prokládaná [9]

## 2. TESTOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI PÁJENÝCH SPOJŮ

Jedna z metod pro stanovení a testování životnosti pájených spojů se provádí pomocí teplotních zkoušek. Jde o tzv. izotermické a cyklické stárnutí. Některé zkoušky se mohou provádět i za zvýšené relativní vlhkosti, např. 95 %. Pro simulování mechanického namáhání se používají přídavné vibrační mechanismy, které se např. hojně využívají, pokud jsou testovány aplikace například pro automobilový průmysl. Sledována je elektrická vodivost spojů, vzhled jednotlivých spojů a mechanická pevnost. Vyhodnocení se provádí pomocí grafických a statistických metod po provedení zkoušek ve stanoveném čase podle sledovaného parametru. [1, 2]

### 2.1 Izotermické stárnutí

V oblasti vnitřní struktury a tloušťky intermetalických vrstev po přetavení mezi pájkovými vývody z různých slitin a pájecích plošek, které jsou chráněny povrchovou úpravou, je důležitá vzájemná soudržnost a odpovídající jakost pájených spojů. Pokud se blíže zaměříme pouze na BGA pájkové kulové vývody, k vyhodnocení vnitřní struktury a spolehlivosti se používají izotermické zkoušky stárnutí. Příklad komory pro zkoušky izotermického stárnutí je uveden na obrázku 3.

V publikaci [11] byl blíže specifikován proces zkoumání růstu intermetalické vrstvy u pájených spojů BGA pouzder s roztečí 1 mm, která měla 256 vývodů z pájecí slitiny SAC305. Testovací desky z materiálu FR4, které měly povrchovou úpravu ENIG, ImAg, ImSn a OSP, byly zapájeny v přetavovací peci. Bezolovnatý proces přetavení byl proveden za maximální teploty 246 °C s časem 78 s nad teplotou tavení. Tvorba intermetalických sloučenin byla urychlena za pomoci izotermického stárnutí při teplotách 100 °C a 125 °C po dobu 350 h a 1000 h. Měření intermetalické tloušťky bylo provedeno za pomoci elektronového mikroskopu. Bylo zjištěno, že po 350 h stárnutí při 125 °C byl růst intermetalických sloučenin u povrchových úprav ImSn, ImAg a OSP srovnatelný. Pozorovaná tloušťka odpovídala průměrně 3 – 4 μm. Tloušťka pro povrchové úpravy ENIG byla vyhodnocena na 2,8 μm, což je méně než u ostatních povrchových úprav. [11]



Obrázek 3: Teplotní a sušicí komora Memmert UF75 [3]

## 2.2 Cyklické stárnutí

Při testech cyklickým stárnutím jsou DPS vystavovány velkým změnám teplot. Tepelné cyklovací komory jsou koncipovány jako dvou nebo tří komorové. Při měnících se teplotách dochází ke vzniku termomechanického namáhání, které vzniká z důvodu rozdílných teplotních roztažností pájecí slitiny a pájecí součástky resp. DPS. V důsledku tohoto jevu dochází ke zhoršení mechanických a elektrických vlastností pájených spojů. Příklad komory pro cyklické stárnutí je uveden na obrázku 4. [4]

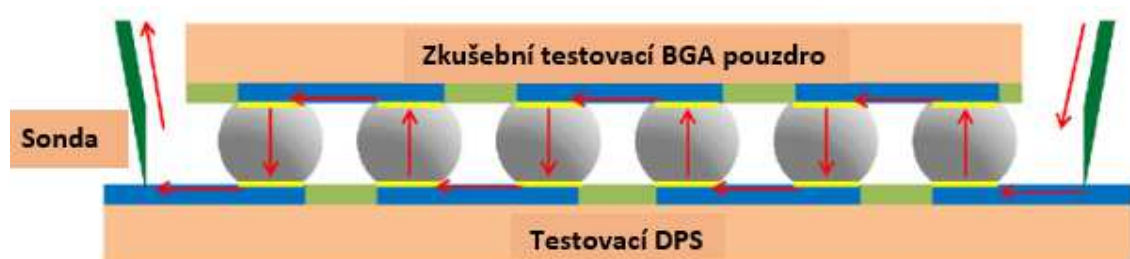


Obrázek 4: Klimatická teplotní komora CTS-T-40/25 [5]

## 2.3 Testování jakosti kulových pájených vývodů u BGA pouzder

Z pohledu funkčního hlediska je nejdůležitější životnost pájeného spoje, resp. jeho dostatečná elektrická vodivost. Životnost ovlivňuje několik faktorů, mezi které patří stárnutí materiálu a vliv intermetalické fáze, mechanické a tepelné namáhání. Existuje několik základních testů a zkoušek (elektrické, mechanické, optické) pro zhodnocení jakosti pájených spojů.

Pro elektrické testování se používají speciální testovací patice, které kontrolují samotné pouzdro BGA tedy bez pájkových kulových vývodů. Propojení patice s testovaným BGA pouzdem může být pomocí pružných kontaktů nebo nepohyblivých hrotů. Otestování probíhá pomocí počítačových programů, které zkontrolují danou součástku. Dalším typem elektrické zkoušky je metoda *Daisy Chain* viz obrázek 5, která spočívá v sériovém propojení vývodů a následným testováním vodivosti. Používá se převážně při zavádění nových materiálu, postupů a procesů. [6,12]



Obrázek 5: Motiv *Daisy Chain* na zkušební testovacím pouzdře BGA a testovací DPS [7]



### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část se zabývá zkoumáním nové metody přetavení BGA pájených vývodů pomocí přímo vyhřívané šablony, která je součástí inovativního zařízení HSR - 01 a vlivem na spolehlivost a životnost pájkových kulových vývodů a také zkoumáním vytvořených intermetalických vrstev a celkové vnitřní struktury pájeného spoje.

#### 3.1 Návrh experimentu

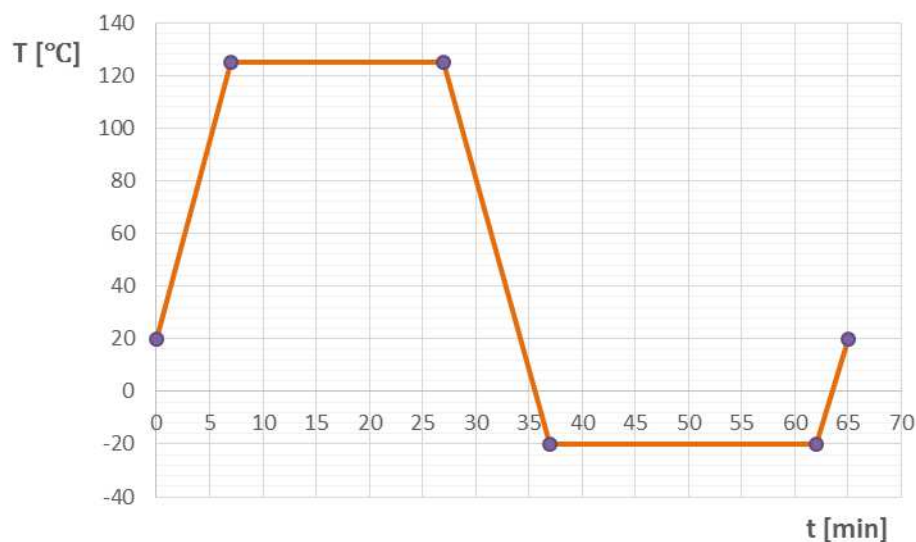
V této diplomové práci je uveden postup zpracování testovacích vzorků BGA pouzder, které budou následně umístěny a zapájeny na testovací DPS. Ověřování spolehlivosti a životnosti pájkových kulových vývodů bude uskutečněno pomocí stárnutí pájkových kulových vývodů, kterým se bude zabývat diplomová práce. Experiment a navržená metodologie jsou rozděleny na dvě části a to zkoumání tloušťky u intermetalických vrstev po izotermickém stárnutí a cyklické stárnutí s životnostními testy pájených spojů. Práce bude také podrobně zkoumat vnitřní strukturu pájkových kulových vývodů po provedených teplotních zkouškách.

Při první zkoušce bude jedenáct testovacích vzorků DPS vystaveno izotermickému stárnutí po dobu 350 h při teplotě 125 °C. Zkouška bude provedena za pomoci zařízení Memmert UF75 Plus. Publikace [11] obsahuje stejné izotermické zkoušky rovněž s pájecí slitinou SAC305 a povrchovou úpravou ENIG u pájecích plošek. Po ukončení izotermického stárnutí budou vzorky BGA pouzder zality do metylmetakrylátové pryskyřice (Dentacrylu) a budou provedeny metalografické výbrusy a proces leptání pro zobrazení morfologického uspořádání. Naměřené tloušťky intermetalických vrstev budou posléze statisticky vyhodnoceny. Tloušťky intermetalických vrstev budou po provedených testech izotermického stárnutí porovnány s výsledky u nestárnutých pájkových kulových vývodů, které jsou uvedeny v bakalářské práci [12] a srovnány s vyhodnocením nestárnutých i stárnutých pájkových kulových vývodů, které obsahuje publikace [11].

Druhou dílčí zkouškou bude cyklické stárnutí osmi vzorků testovaných BGA pouzder, která jsou osazena na testovací DPS. Na jednu testovací DPS budou připájeny čtyři testovací BGA pouzdra. Cyklické teplotní zkoušky zrychleného stárnutí budou realizovány v klimatické teplotní komoře CTS-T-40/25. Komoře je ovládána pomocí softwaru CID-PRO 4.00, ve kterém se nastavuje požadovaný teplotní profil. Program zobrazuje aktuální teplotu průběhu a rovněž i údaje o provedených cyklech. Teplotní profil byl uzpůsoben a nastaven pro větší rozsah teplot než je určen pro spotřební elektroniku. Odpovídající teplotní cyklus byl zvolen s rozsahem teplot od - 20/125 °C viz (obrázek 6) z důvodu nemožnosti nastavení nižší požadované teploty - 45 °C kvůli nedosažení této teploty v použité teplotní komoře. Byly zvoleny časové prodlevy

s dobami náběhů resp. sestupů teplot 10 minut a 25minutové teplotní prodlevy. Testovací vzorky budou podrobeny 5000 cyklům, což odpovídá 7 měsícům nepřetržitého cyklování. Výsledky budou porovnány s publikací [13], která zkoumá rovněž cyklické stárnutí pájkových kulových vývodů s podobnými teplotními cykly. Teplotní profil bude porovnán také podle hodnot uvedených v publikaci [14]. Zvolený teplotní cyklus zde odpovídá teplotě 0/100 °C s dobami náběhů resp. sestupů teplot 15 minut a 30minutové teplotní prodlevě. Jeden teplotní cyklus trvá tedy 90 minut. Celková doba testu zde byla 6 měsíců, to odpovídá přibližně 3000 teplotním cyklům.

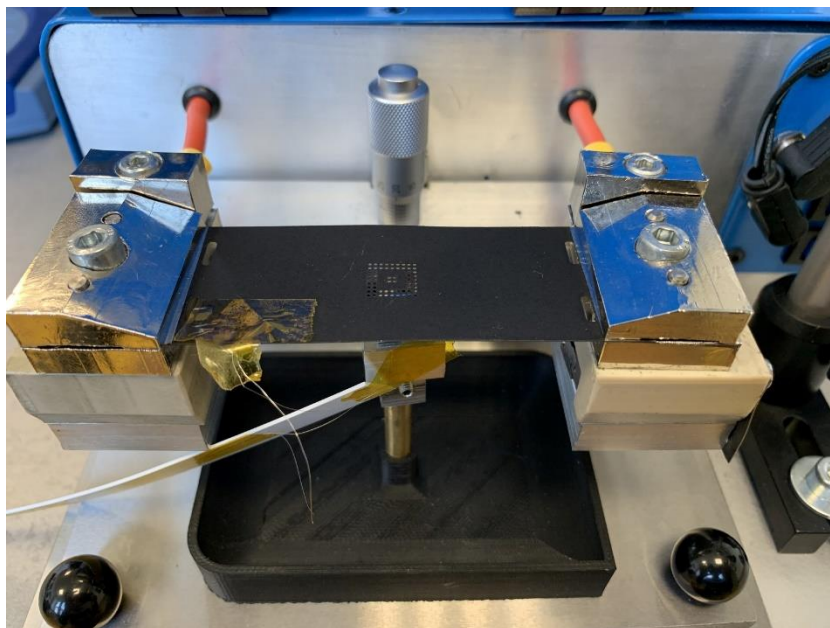
Pomocí komunikační desky se bude vyhodnocovat odpor mezi jednotlivými testovanými spoji resp. řadami testovací DPS, pomocí něhož bude komunikační přípravek zjišťovat, zda nedošlo k poruše vodivosti pájkového kulového spoje. Spolehlivost pájených spojů se určí z počtu provedených cyklů, počtu cyklů do poruchy a rovněž budou statisticky vyhodnocena naměřená data, která budou porovnána s výsledky uvedenými v publikacích [13], [14] a dalšími.



Obrázek 6: Nastavený teplotní profil pro cyklické testování vzorků

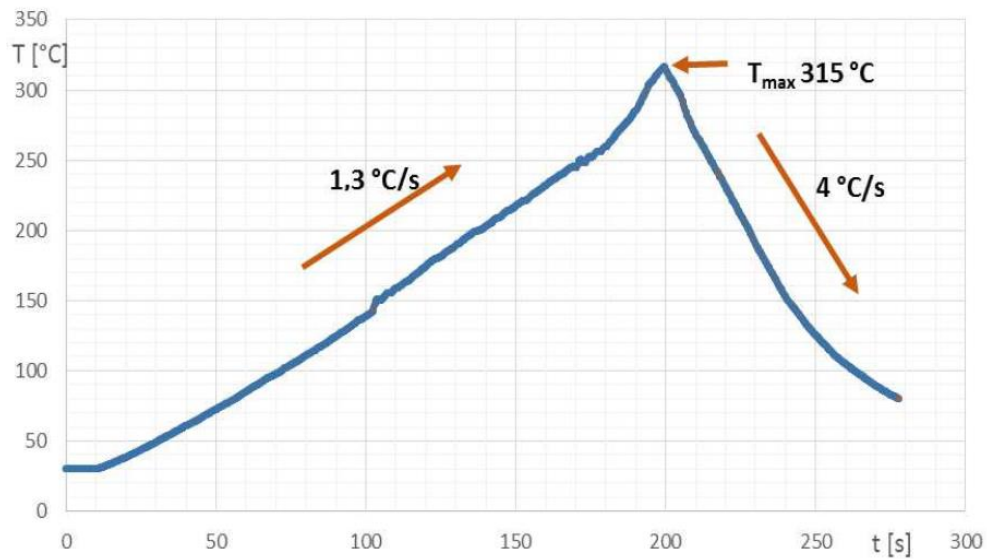
### 3.2 Přetavení pájkových kulových vývodů na pouzdrech BGA

V diplomové práci byly zhotoveny testovací vzorky BGA pouzder za použití zařízení HSR-01 s přímo vyhřívanou šablonou, která je zachycena na obrázku 7. Pro experiment bylo vybráno standardní testovací pouzdro BGA s rozměry 11 x 11 x 1,5 mm laminátu FR4 s černou nepájkivou maskou. Pájecí plošky byly navrženy s průměrem 400 μm s ohledem na použité 500 μm pájkové kuličky. Povrchová úprava byla zvolena ENIG z důvodu vhodnosti pro bezolovnaté pájení a rovinnost povrchu, což je pro BGA pouzdra velmi důležité. Pájecí plošky jsou kruhových tvarů o průměru 400 μm.

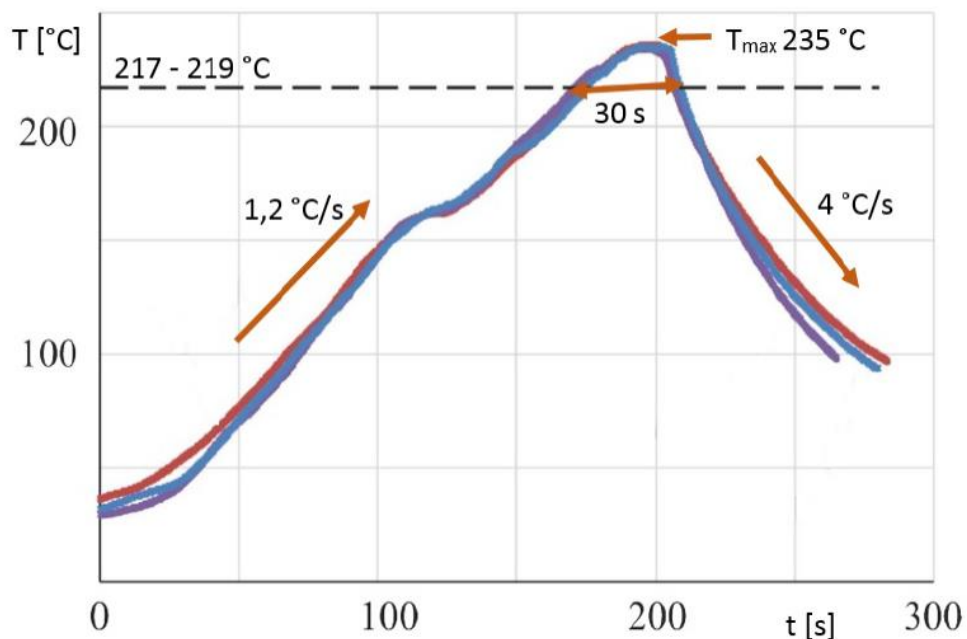


Obrázek 7: Přímou vyhřívání šablona upevněná na svorkách zařízení HSR-01

Před samotným procesem zhotovení pájkových kulových vývodů byla testovací BGA pouzdra očištěna pomocí isopropylalkoholu. Na pájecí plošky bylo ručně pod mikroskopem pomocí dispenseru nanášeno adekvátní množství tavidla ROL0 od výrobce Shenmao Technology Inc. (NeVo GmbH) typu SMF-08. Na pájecím zařízení HSR-01 byla nastavena ověřená vzdálenost pouzdra vzorku od přímou vyhřívání šablony 250  $\mu\text{m}$ , která vychází z předešlého experimentu a je uvedena v práci [12]. Dále bylo testovací BGA pouzdro umístěno do držáku zařízení HSR-01 a byl zapnut systém vakua pro lepší uchycení pájeného pouzdra. Proběhlo také přesné sesazení BGA pouzdra a otvorů v přímou vyhřívání šabloně, která je zhotovena z nerezové oceli a její tloušťka je 300  $\mu\text{m}$ . Posuvný sesazovací stolek pájecího zařízení byl rovněž po provedeném sesazení přidržen pomocí vakua. V předposlední fázi byly ručně za pomoci pinzety osazeny jednotlivé pájkové kuličky o průměru 500  $\mu\text{m}$  tvořené slitinou SAC305 s označením PF 684 – S rovněž od výrobce Shenmao Technology Inc. (NeVo GmbH). Konečná fáze obsahovala spuštění předem definovaného a ověřeného teplotního profilu vyhřívání šablony. Tento teplotní profil je znázorněn na obrázku 8, který odpovídá přetavovanému teplotnímu profilu na povrchu pouzdra (viz obrázek 9). Celkem bylo touto cestou zhotoveno 19 testovacích BGA vzorků. Z těchto 19 testovacích vzorků bylo dále osazeno 8 z nich na testovací DPS viz následující kapitola 3.2. [12]



Obrázek 8: Teplotní profil vyhřívání šablony tloušťky 300 µm

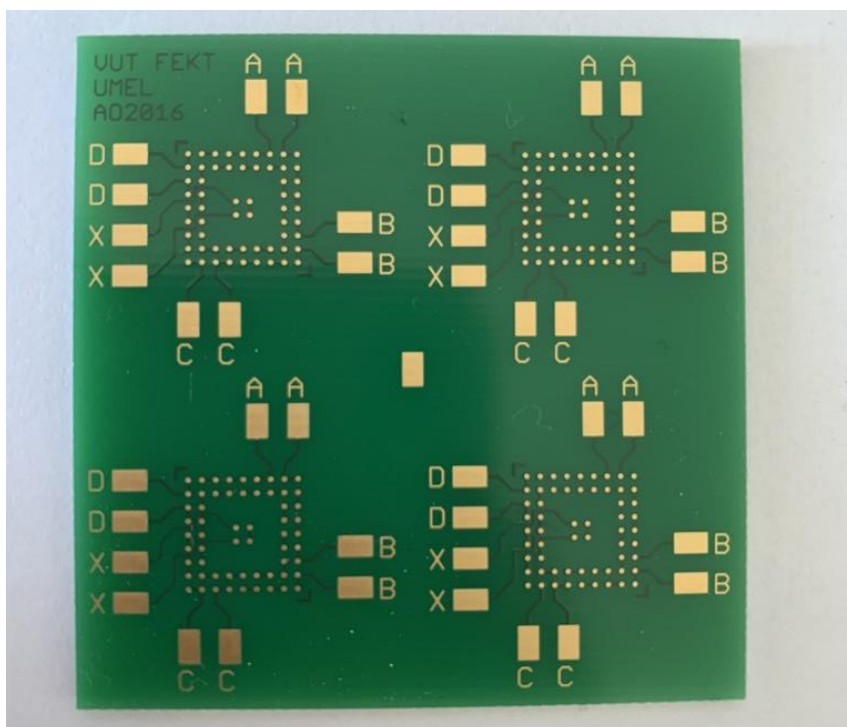


Obrázek 9: Nastavovaný teplotní profil [15]

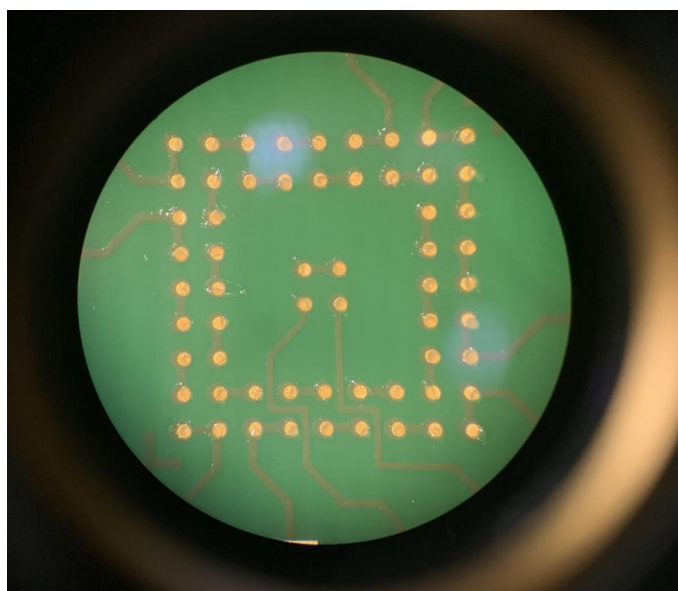
### 3.3 Přetavení testovacích pouzder BGA a testovací DPS

Testovací DPS (viz obrázek 10), které obsahují *Daisy Chain* motiv, jež slouží ke zjišťování vodivosti mezi jednotlivými ploškami, byly nejprve očištěny pomocí izopropylalkoholu. Dále bylo na pájecí plošky ručně pod mikroskopem pomocí dispenseru nanášeno adekvátní množství tavidla ROL0 od výrobce Shenmao Technology Inc. (NeVo GmbH) typu SMF-08 (viz obrázek 11). Celkem byly zhotoveny dvě testovací

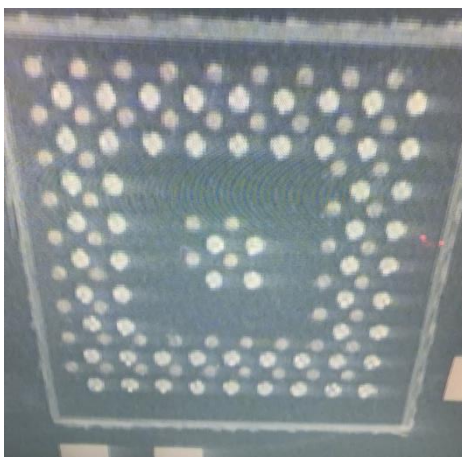
DPS, na které se osadilo 8 testovacích pouzder BGA. Osazení již zhotovených testovacích BGA pouzder probíhalo na sesazovacím zařízení Fritsch Hot-Air-04 s pomocí vestavěného optického hranolu. Stav před sesouhlasením testovacího BGA pouzdra a testovací DPS je zachycen na obrázku 12. Již sesouhlasené testovací BGA pouzdra a testovací DPS znázorňuje obrázek 13.



Obrázek 10: Testovací DPS s motivem *Daisy Chain*



Obrázek 11: Detail testovací DPS po nanesení tavidla



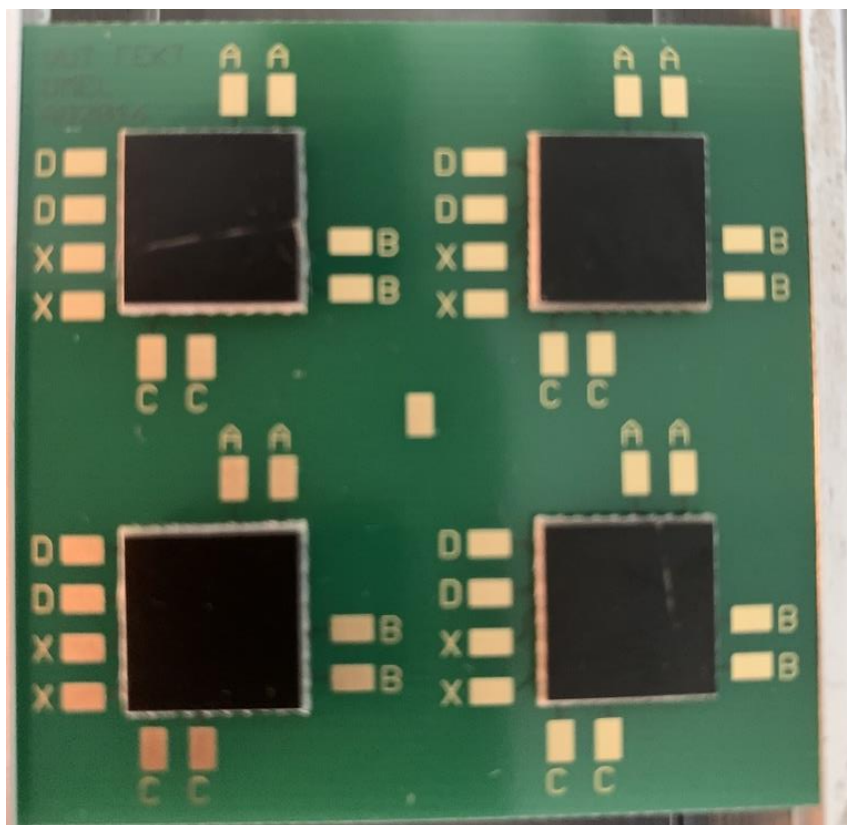
Obrázek 12: Před sesouhlasením testovacího BGA pouzdra a testovací DPS



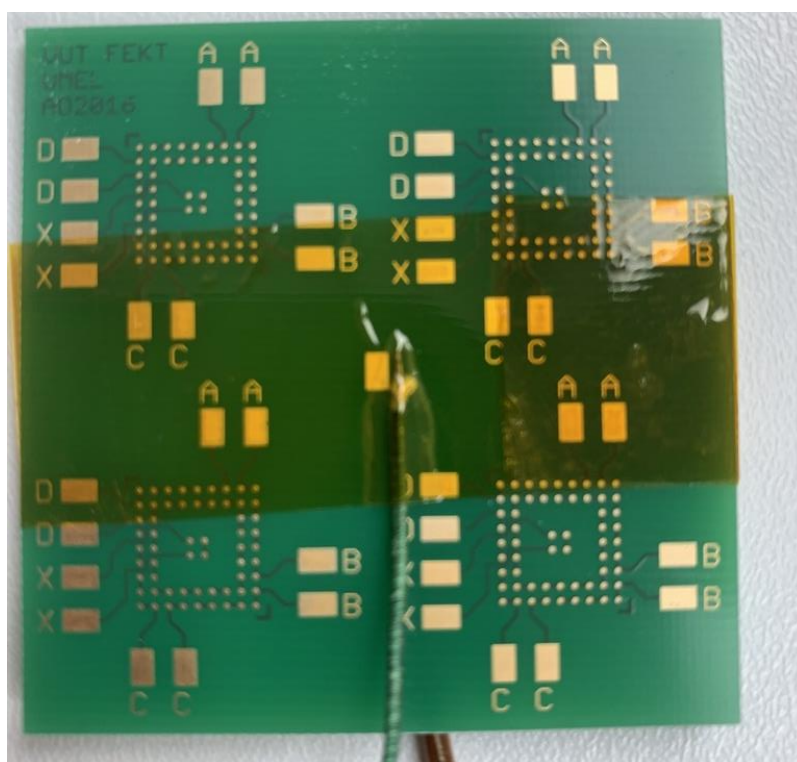
Obrázek 13: Po sesouhlasení testovacího BGA pouzdra a testovací DPS

Po sesouhlasení bylo provedeno sesazení testovacího BGA pouzdra na testovací DPS. Tento krok zachycuje obrázek 14. Poté již bylo provedeno přetavení celku v průtažné peci s nucenou konvekcí typu Essemtec RO300FC. Jedná se o čtyřzónovou pec, která má tři tepelné zóny a jednu chladicí. První dvě tepelné zóny byly nastaveny na 190 °C a třetí na 245 °C. Rychlost dopravníku byla nastavena na 240 mm/min. Teplotní profil byl předem ověřen pomocí zkušební DPS, na kterou byly přilepeny dva termočlánky nejen z vrchní, ale i ze spodní strany desky (viz obrázek 15). Výsledný profil je zachycen na obrázku 16. Teplotu vrchní strany DPS znázorňuje černá křivka, teplotu spodní strany desky křivka šedá. Ostatní tři téměř konstantní průběhy jsou referenční nastavené teploty jednotlivých tepelných zón.

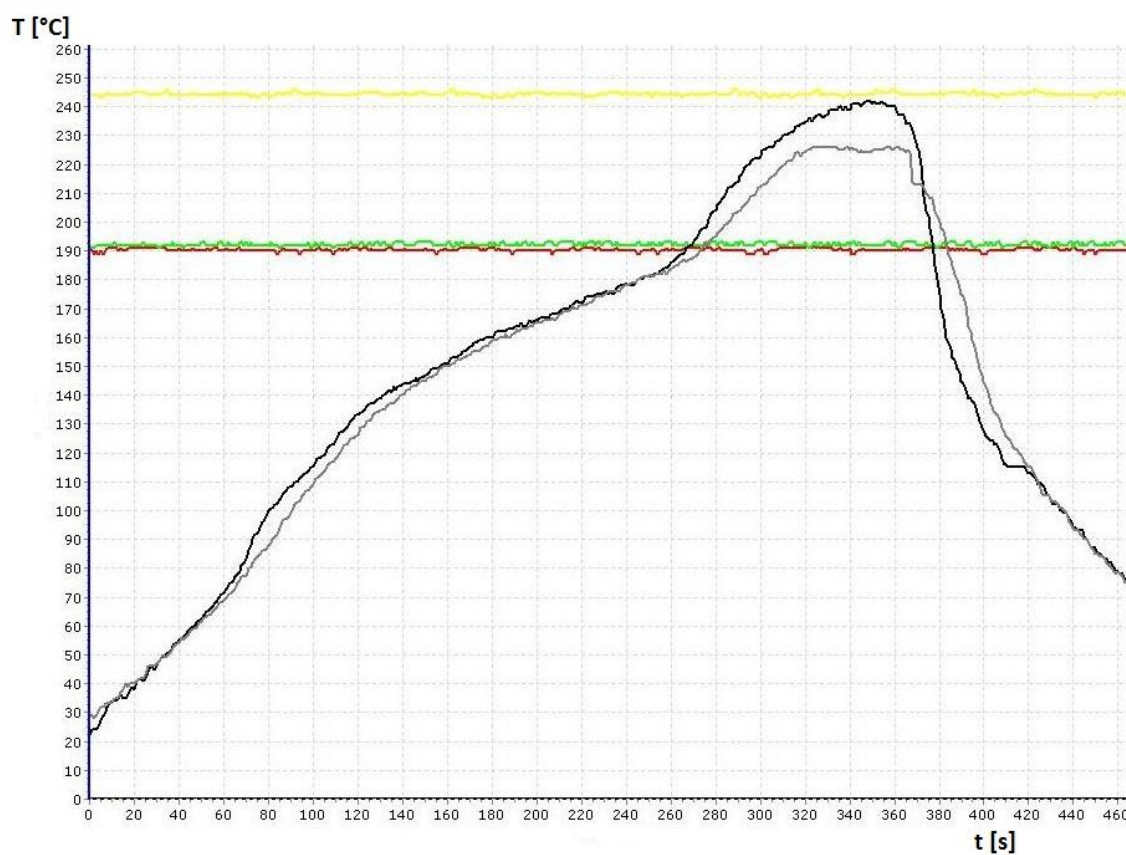




Obrázek 14: Záběr po osazení testovacího BGA pouzdra a testovací DPS



Obrázek 15: Testovací DPS s uchycenými termočlánky z horní i spodní strany



Obrázek 16: Teplotní profil při pájení v horkovzdušné peci

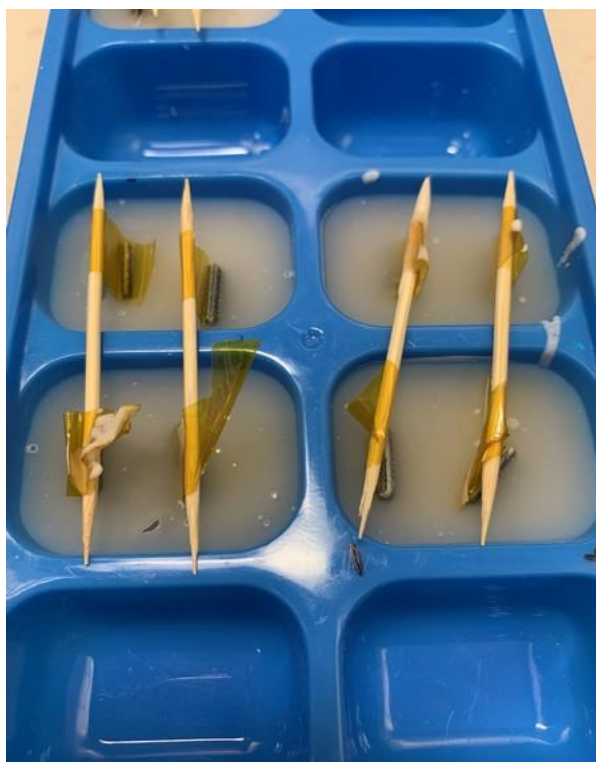
Po dokončení přetavovacího procesu byly pájené testovací DPS, které obsahují *Daisy Chain* motiv, otestovány, zda je mezi jednotlivými stranami a ve střední části testovacího pouzdra a testovací DPS odpovídající vodivé propojení. U dvou testovaných propojení nebylo dosaženo dostatečného vodivého propojení. Tyto vzorky byly následně podrobeny rentgenové optické inspekci a budou vyhodnoceny v diplomové práci.



## 4. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

### 4.1 Izotermické stárnutí a vliv na tloušťku intermetalické vrstvy a její drsnost

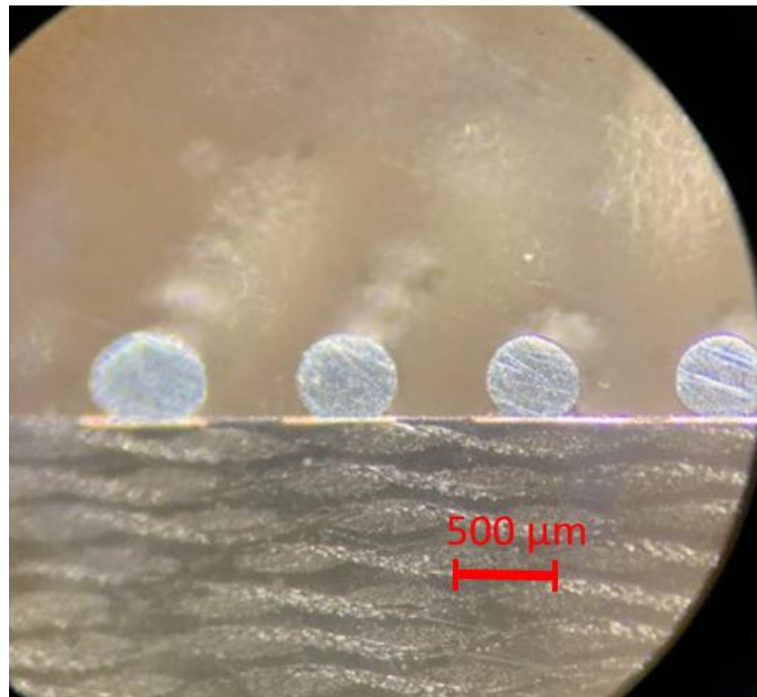
Pro zkoumání tloušťky intermetalických vrstev bylo zhotoveno celkem 11 vzorků BGA pouzder na pájecím zařízení HSR-01. Byla nastavena ověřená vzdálenost pouzdra vzorku od přímo vyhřívané šablony 250  $\mu\text{m}$ , která vychází z předešlého experimentu a je uvedena v práci [12]. Tyto vzorky byly podrobeny izotermickému stárnutí po dobu 350 h při teplotě 125  $^{\circ}\text{C}$ , ze kterých byly následně provedeny metalografické výbrusy pro účely statistického určení tloušťky a efektivní drsnosti intermetalické vrstvy. Vzorky byly nejprve připevněny pomocí kaptonové pásky a zality akrylátovou hmotou Dentacryl (viz obrázek 17). Dále byly vzorky po vytvrzení rozpůleny pomocí ruční pilky a nahrubo obroušeny stojanovou bruskou.



Obrázek 17: Vzorky zapájených BGA pouzder po zalití Dentacrylem

Všech 11 vzorků bylo ručně postupně broušeno na brusných papírech za mokra. Zrnitosti brusných papírů byly zvoleny 600, 1000 a 1200 s dalším doleštěním na filcové podložce s roztokem oxidu hlinitého s velikostí částic o průměru do 5  $\mu\text{m}$ . Průběžný stav kvality broušení byl sledován pod mikroskopem, aby se dosáhlo co nejlepšího výsledku

s co nejmenšími vrypy a zachování nejlepší rovinnosti broušeného povrchu vzorku. Výsledný metalografický výbrus je zachycen na obrázku 18.



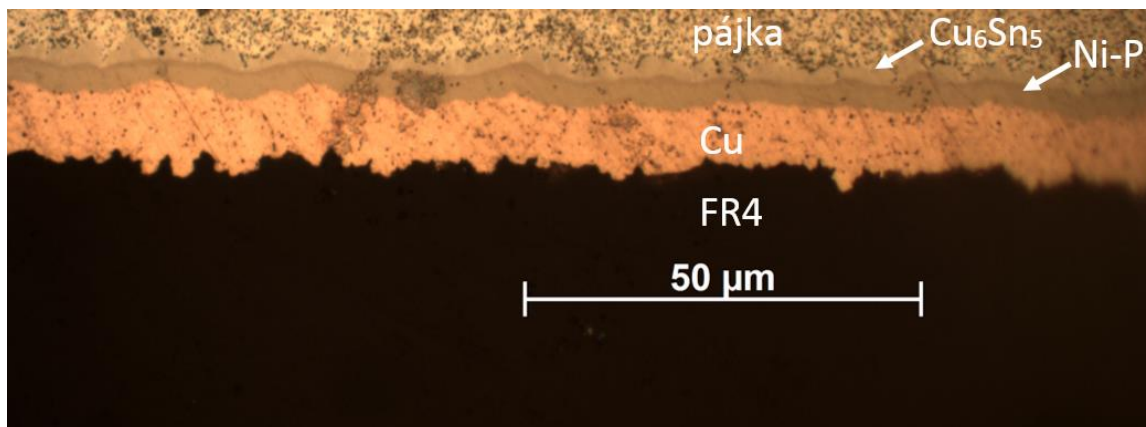
Obrázek 18: Metalografický výbrus BGA kuliček po leštění vzorku roztokem oxidu hlinitého

#### 4.1.1 Analýza intermetalických vrstev

Zpracované metalografické výbrusy byly podrobeny analýze zkoumání intermetalických vrstev. Sledována byla zejména oblast rozhraní pájka a intermetalická vrstva s chemickým složením  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Všechna rozhraní jsou zobrazena na obrázku 19. Dále byla stanovena intermetalická tloušťka a drsnost intermetalické vrstvy  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  pomocí počítačové analýzy v programu ImageJ. Na začátku analýzy byla provedena kalibrace měřítka v programu ImageJ s měřítkem snímku pořízeným optickým mikroskopem Zeiss Axio Imager.M2m s nastaveným zvětšením 1000x. Zkoumaná intermetalická vrstva byla ručně ořezána a převedena do černé barvy (viz obrázek 20). Z této ořezané části byla změřena její celková délka a rovněž plocha, z čehož byla následně vypočtena střední tloušťka intermetalické vrstvy (MSL) pomocí rovnice [15]:

$$MSL = \frac{A}{L}, \quad (1)$$

kde  $MSL$  je hodnota odpovídající průměrné tloušťce intermetalické vrstvy,  $A$  je plocha intermetalické vrstvy a  $L$  je její délka.



Obrázek 19: Oblast intermetalického rozhraní vzorku po izotermickém stárnutí pořízená mikroskopem se zvětšením 1000x



Obrázek 20: Ořezaná část intermetalické vrstvy po izotermickém stárnutí vzorku pomocí programu ImageJ

Pro určení efektivní drsnosti povrchu intermetalické vrstvy  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  byla ořezána a narovnána část intermetalické vrstvy a také se provedlo ořezání spodní části. Z této upravené vrstvy, která je zachycena na obrázku 21, byly následně odečteny výšky intermetalických výčnělků, které byly dosazeny do následující rovnice [15]:

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i^2}, \quad (2)$$

kde  $R_{rms}$  je efektivní drsnost povrchu intermetalické sloučeniny,  $N$  je celkový počet měřených hodnot,  $i$  je pořadí měřené hodnoty a  $Z$  je tloušťka intermetalické nerovnosti měřená od  $MSL$ .



Obrázek 21: Ořezaná a narovnaná část intermetalické vrstvy po izotermickém stárnutí vzorku pomocí programu ImageJ

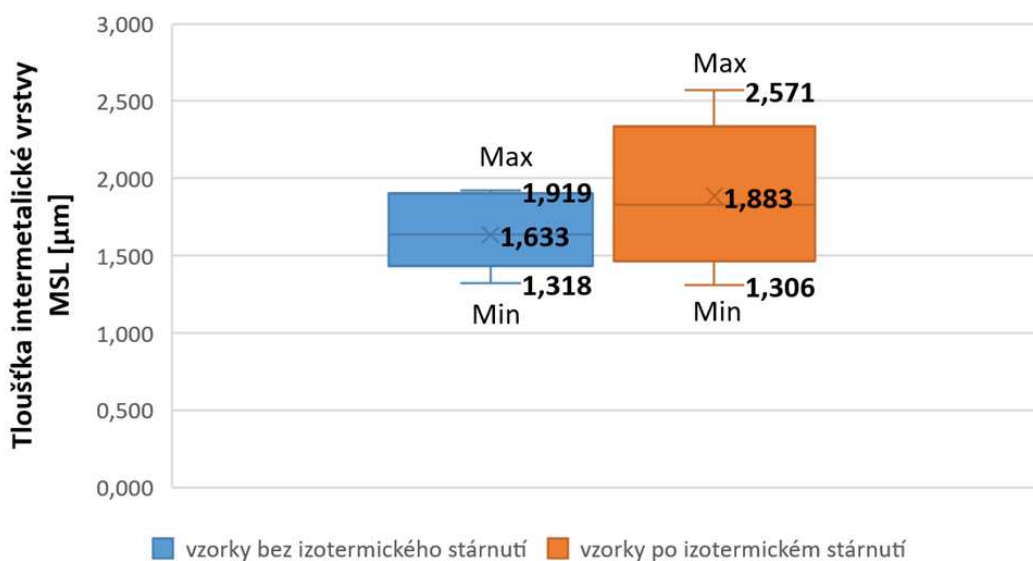
#### 4.1.2 Výsledky a vyhodnocení

Celkem bylo vyhodnoceno pro statistické zpracování 11 vzorků, kdy byly provedeny standardní statistické t-testy se studentovým rozdělením. V grafu 1 jsou zobrazena výsledná data průměrné tloušťky intermetalické vrstvy u izotermicky nestárnutého a stárnutého vzorku. Graf zachycuje průměrnou, maximální a minimální tloušťku

intermetalické vrstvy a také celkový rozptyl analyzovaných hodnot. Data pro nestárnuté vzorky byla použita z předchozího měření v bakalářské práci [12].

Při porovnání s výsledky, které obsahuje publikace [11], kde je použita stejná povrchová úprava ENIG se stejnou dobou i teplotou izotermického stárnutí, bylo zjištěno, že průměrná tloušťka intermetalické vrstvy před stárnutím byla v publikaci rovna 2,5  $\mu\text{m}$  oproti zde používané metodě přetavení pomocí přímo vyhřívané šablony, kde byla změřena průměrná tloušťka intermetalické vrstvy 1,635  $\mu\text{m}$ . Po izotermickém stárnutí byla průměrná tloušťka intermetalické vrstvy rovna 1,883  $\mu\text{m}$  na rozdíl od hodnoty uvedené v publikaci [11], kde činila 2,8  $\mu\text{m}$ . Z důvodu použití jiných metod přetavení byla tloušťka intermetalické vrstvy rozdílná, avšak nárůst daný izotermickým stárnutím činil přibližně 0,3  $\mu\text{m}$  u obou zde porovnaných analýz izotermického stárnutí. Dále lze z grafu vyčíst nárůst maximálních hodnot tloušťky intermetalických vrstev oproti zachování jejich minimálních hodnot.

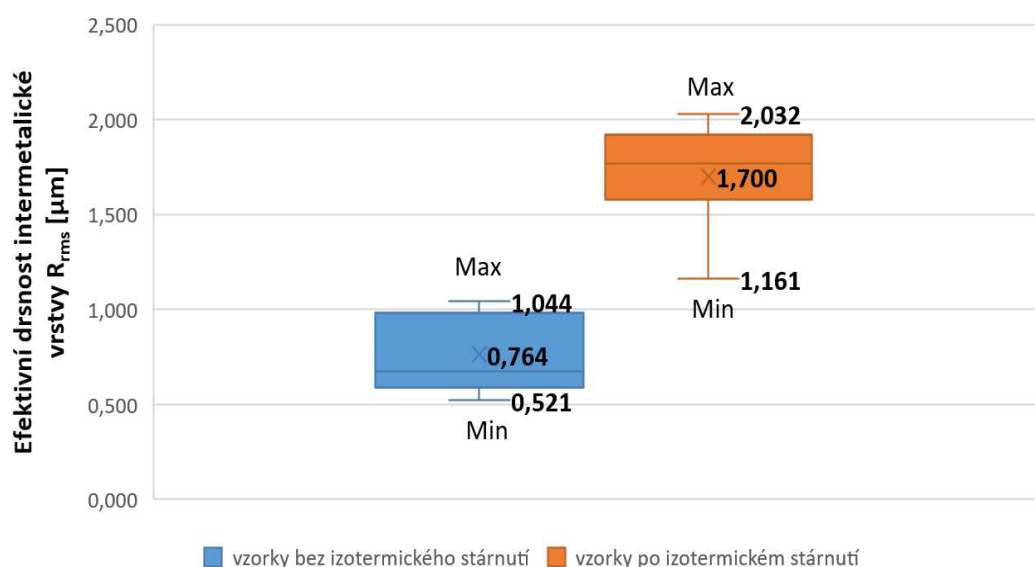
Tyto naměřené hodnoty intermetalických vrstev jsou podloženy také informacemi uvedené v publikaci [16]. Za použití pájecí slitiny SAC305 pro pájkové kulové vývody, které byly vystaveny izotermickému stárnutí rovněž teplotě 125  $^{\circ}\text{C}$  po dobu 350 h, se tloušťka intermetalické vrstvy zvětšila do 1  $\mu\text{m}$ .



Graf 1: Statistické srovnání tloušťky intermetalické vrstvy u izotermicky nestárnutého a stárnutého vzorku

Statistické srovnání tloušťky efektivní drsnosti intermetalické vrstvy u izotermicky nestárnutého a stárnutého vzorku je uvedeno v grafu 2. V tomto grafu je zobrazen rozptyl hodnot drsností, minimální, maximální a také průměrná hodnota efektivní drsnosti. Data pro nestárnuté vzorky byla použita z předchozího měření z mé bakalářské práce [12]. Srovnáním nestárnutého a stárnutého vzorku byl zjištěn nárůst průměrné efektivní

drsnosti intermetalické vrstvy z hodnoty 0,764  $\mu\text{m}$  na hodnotu 1,700  $\mu\text{m}$ , což odpovídá rozdílu nárůstu přibližně 1  $\mu\text{m}$ .



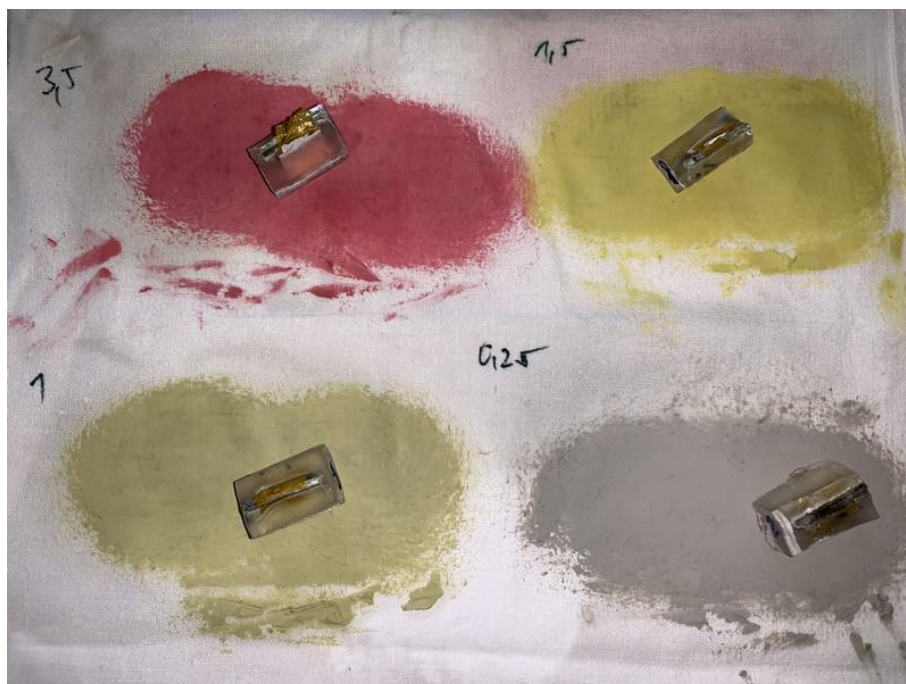
Graf 2: Statistické srovnání efektivní drsnosti intermetalické vrstvy u izotermicky nestárnutého a stárnutého vzorku

## 4.2 Izotermické stárnutí a vliv na počet a orientaci krystalografických rovin

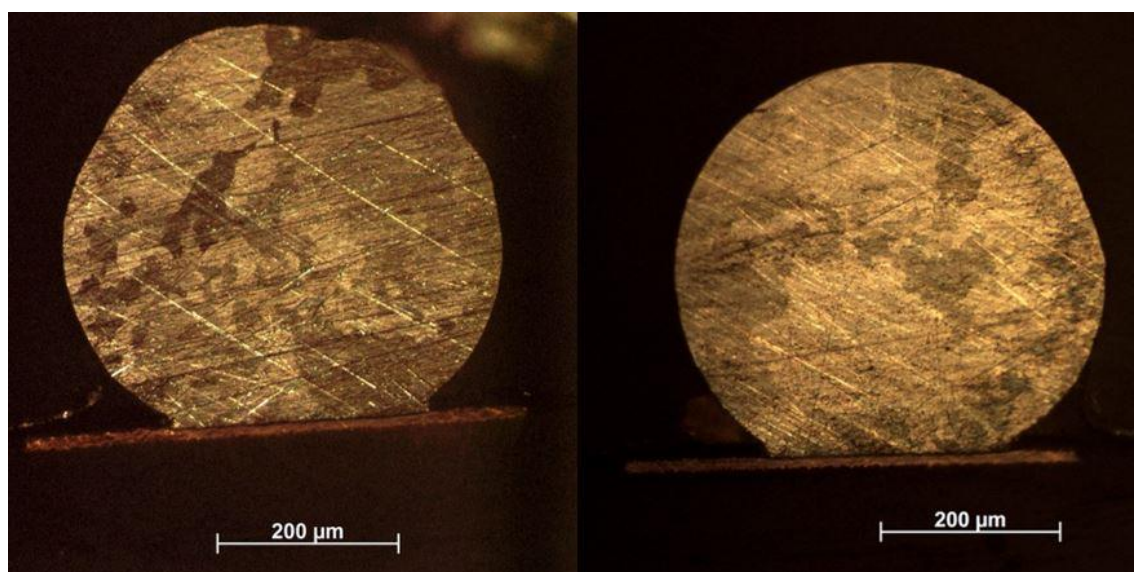
K určení počtu a orientaci krystalografických rovin bylo nejprve provedeno leštění celkem jedenácti vzorků za pomoci diamantových lapovacích past od firmy Dimapa. Doleštění vzorků probíhalo ve čtyřech fázích se zrnitostmi diamantových past 3,5  $\mu\text{m}$ , 1,5  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  a 0,25  $\mu\text{m}$ . Diamantové pasty se skládají z diamantového prášku a pojiva, které má zároveň mazací a chladicí účinek. Názorné zobrazení procesu leštění je zobrazeno na obrázku 22. Následné optické zkoumání probíhalo na optickém mikroskopu Zeiss Axio Imager.M2m s nastaveným zvětšením 200x za použití polarizačního filtru, který slouží k zviditelnění morfologické struktury.

Na obrázku 23 je vyobrazena částečně prokládaná morfologie zrn cínu kulového pájkového spoje pořízená optickým mikroskopem se zvětšením 200x. Obrázek 24 ukazuje prokládané morfologie zrn cínu kulového pájkového vývodu. Většina z analyzovaných vzorků měla tři druhy odstínů šedi tj. zde jednotlivých krystalografických orientací. Morfologie kulových pájkových vývodů, které byly přetaveny inovativní metodou pomocí přímo vyhřívané šablony, vykazují dostatečné známky prokládaných struktur a jeví se jako výhodné z pohledu odolnosti vůči teplotní roztažnosti a teplotnímu namáhání. Publikace [10] uvádí změny struktur po izotermickém stárnutí hlavně zvyšujícím se procentuálním zastoupením vícezrnných struktur, které jsou podloženy mnohačetnými metalografickými výbrusy před i po započítání stárnutí vzorků.

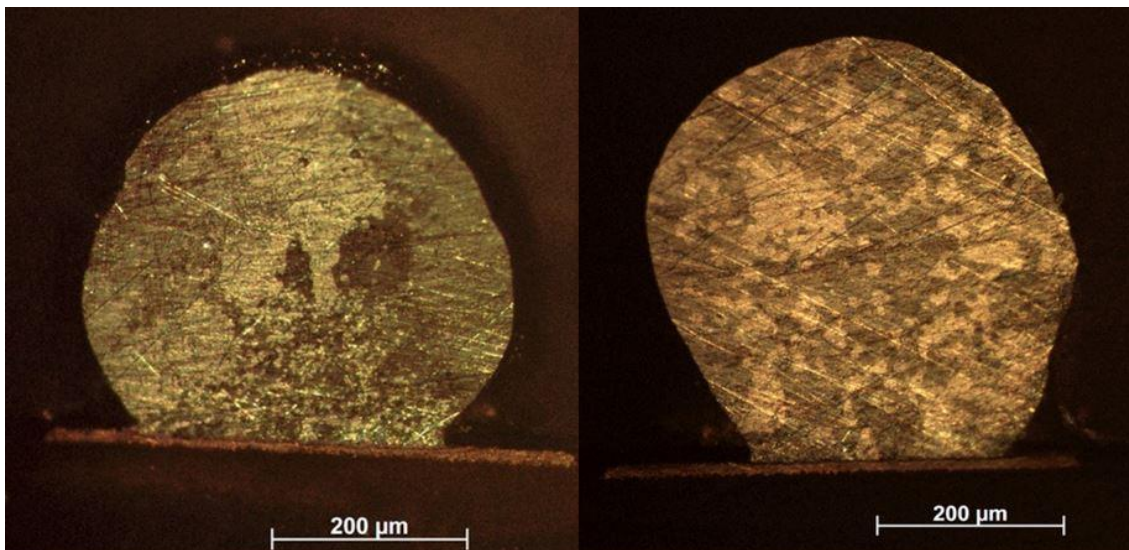




Obrázek 22: Leštění vzorků pomocí diamantových past



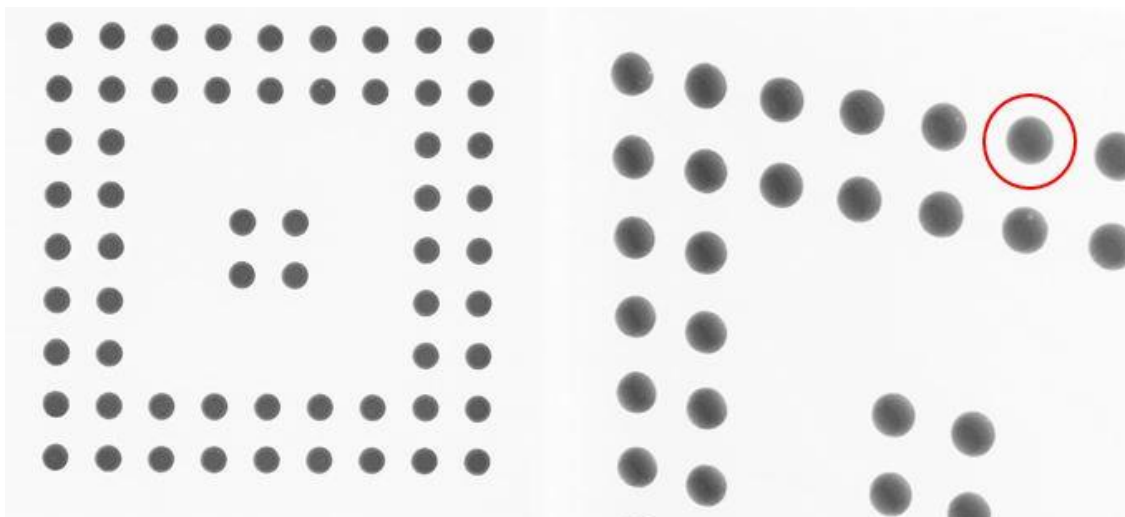
Obrázek 23: Částečně prokládaná morfologie zrn cínu kulového pájkového spoje pořízená optickým mikroskopem se zvětšením 200x



Obrázek 24: Prokládaná morfologie zrn cínu kulového pájkového spoje pořízená optickým mikroskopem se zvětšením 200x

### 4.3 Cyklické stárnutí a vliv na spolehlivost pájeného spoje

Po zapájení a před cyklickým stárnutím zkušebních testovacích BGA pouzder přetavených na testovacích DPS byla provedena inspekce pájkových kulových vývodů za pomoci rentgenu. Prvotní ověření elektricky vodivých spojů mezi řadami s *Daisy Chain* motivem bylo uskutečněno pomocí multimetru. Za pomoci metody rentgenové inspekce byly zjištěny dva konkrétní špatně zapájené vývody, které jsou zachyceny v detailním zobrazení a také zaznačeny červeně na obrázcích 25 a 26. Špatně zapájený spoj mohl vzniknout v důsledku nenanesení adekvátního množství tavidla nebo nečistotou zanechanou na pájecích ploškách i přes prvotní očištění. Kvůli tomu došlo k celkovému nesmočení pájecí slitiny a nevytvořil se elektricky vodivý kontakt mezi jednotlivými rozhraními pájecí plošky a pájkového kulového vývodu.



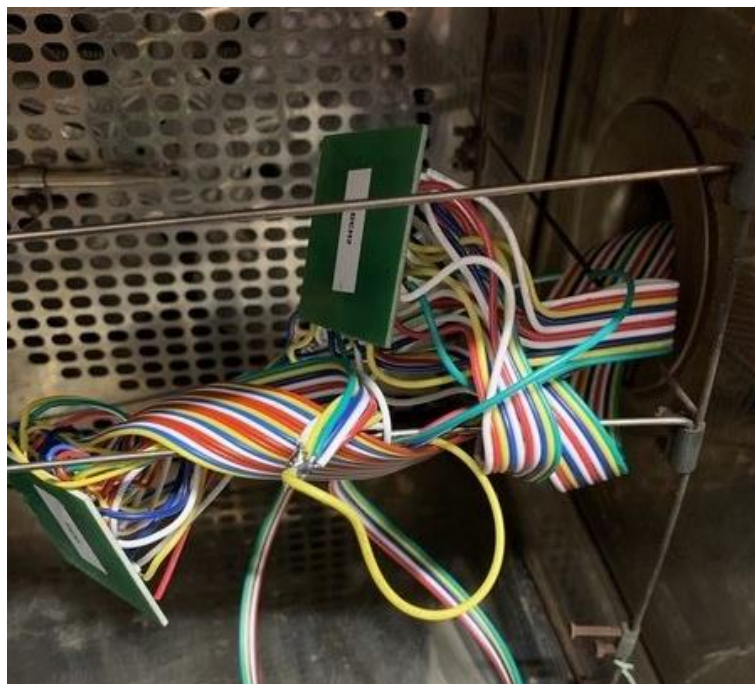
Obrázek 25: Rentgenová inspekce zapájeného BGA pouzdra 1 na zkušební DPS s identifikací nevodivého spoje (označeno červeně)



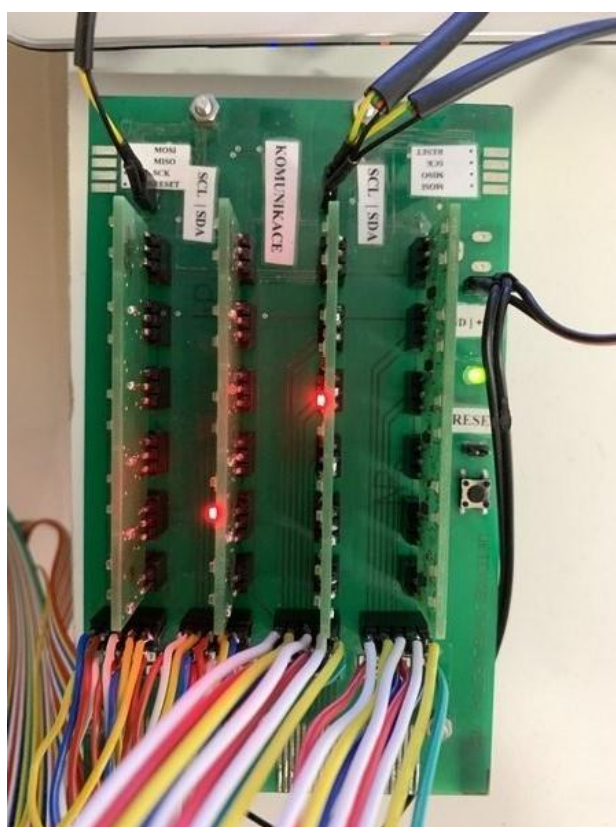
Obrázek 26: Rentgenová inspekce zapájeného BGA pouzdra 2 na zkušební DPS s identifikací nevodivého spoje (označeno červeně)

Následně byly zkušební vzorky testovacích DPS umístěny do teplotní cyklovací komory (viz obrázek 27) a byly provedeny testy zrychleného stárnutí. Odpovídající teplotní cyklus byl zvolen s rozsahem teplot od - 20/125 °C a celkovým počtem 5000 teplotních cyklů. Nalezená a analyzovaná nevodivá spojení detekovala hlavní zkušební deska, která je zachycena na obrázku 28.





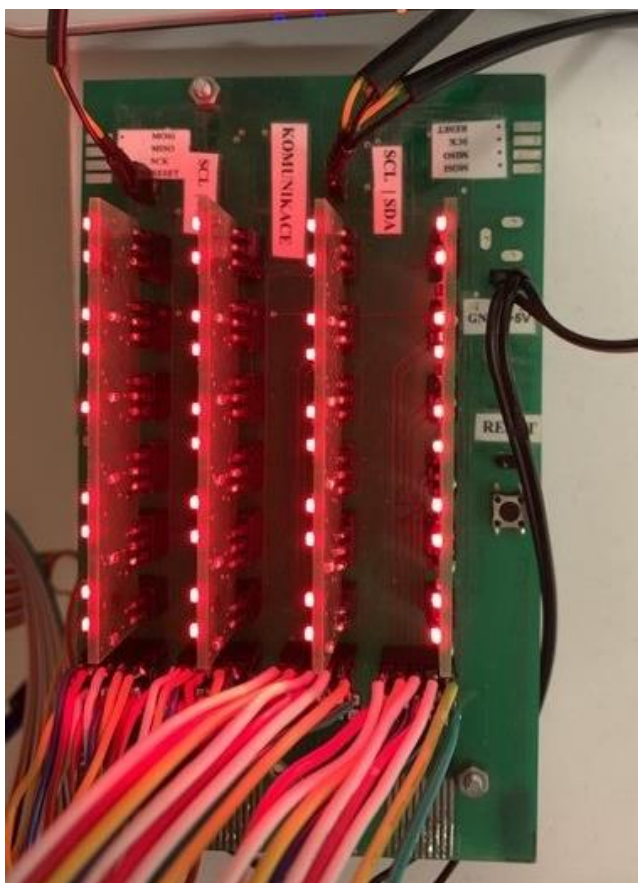
Obrázek 27: Testovací DPS v cyklovací komoře před teplotním cyklickým stárnutím



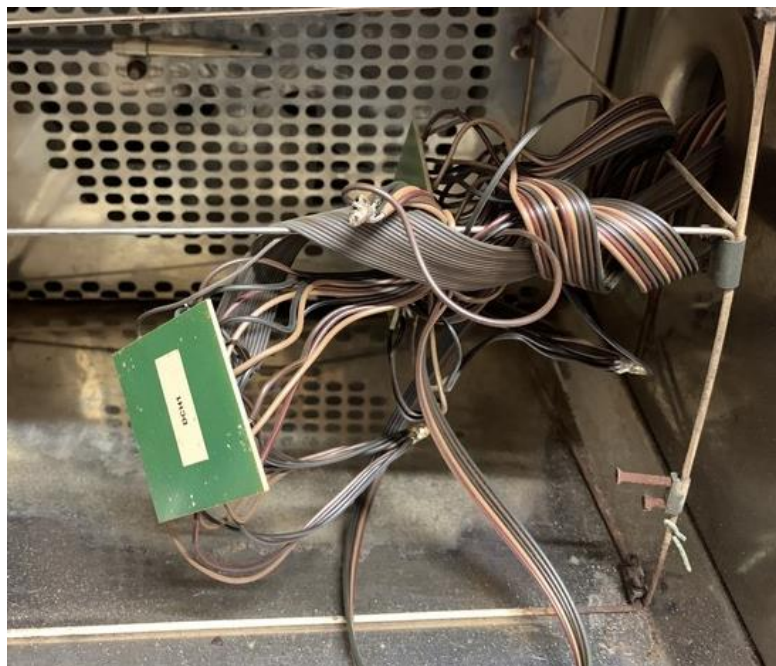
Obrázek 28: Hlavní deska zobrazující stav elektrické vodivosti jednotlivých spojů před cyklickým stárnutím vzorků

S narůstajícím počtem teplotních cyklů se rovněž zvyšovala projevená nevodivá spojení, která byla způsobena i přerušením elektrické vodivosti pájených spojů resp. přívodních kabelů, které byly zapájeny olovnatou pájkou se složením Sn63Pb37 pomocí ruční mikropájkky. Všechny zachycené elektrické nevodivosti, které byly detekovány za 5000 teplotních cyklů, jsou zachyceny na obrázku 29. Pohled na teplotně degradované zkušební testovací DPS je uveden na obrázku 30, detailně poté na obrázku 31.

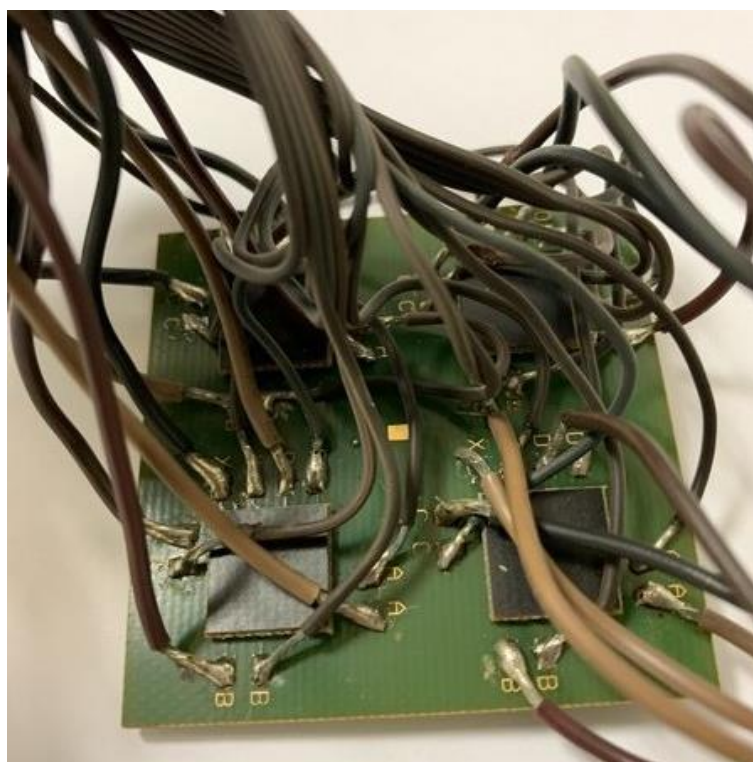
Po ukončení teplotního cyklování byly zkušební DPS důkladně analyzovány. Nejprve bylo zjištěno, zda nejsou poškozeny kabelové svazky a mají odpovídající vodivostní vlastnosti, které zajišťují elektrické propojení testovací a zkušební deskou. Dále byly zjištěny a zaznamenány elektrické vodivosti mezi spoji na testovací DPS pomocí přenosného multimetru. Důležitým zkoumáním bylo rovněž vodivé spojení mezi pájecími ploškami a vodivými cestami, které byly opatrně odkryty, jak je znázorněno na obrázku 32. Toto zkoumání odhalilo vysoký počet defektů na rozhraní pájecí plošky, pájecí slitiny a kabelového přívodu. Z 80 zkoumaných přívodových spojů byla elektrická vodivost přerušena u 32 z nich. Tato zjištění byla zahrnuta do dalších statistik a do vyhodnocení spolehlivosti samotných pájkových kulových vývodů.



Obrázek 29: Hlavní deska zobrazující stav elektrické vodivosti jednotlivých spojů po cyklickém stárnutí vzorků

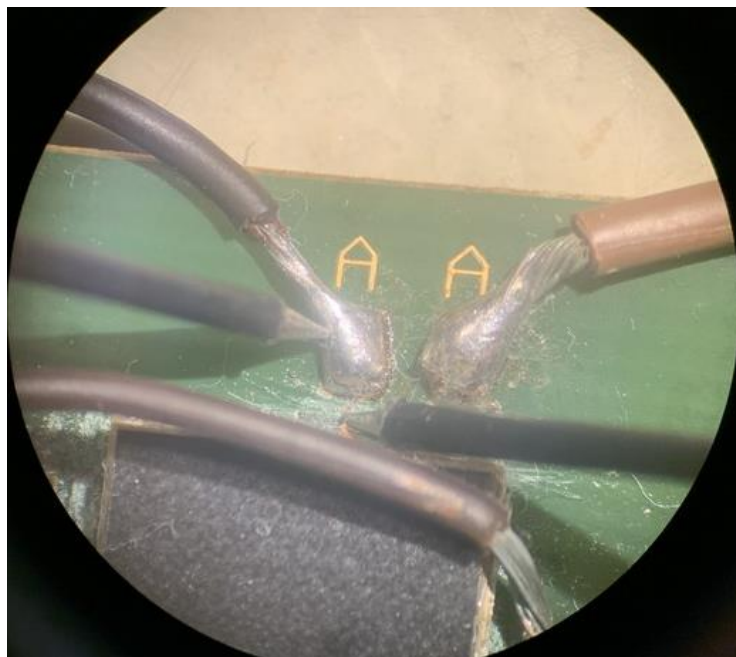


Obrázek 30: Testovací DPS v cyklovací komoře po teplotním cyklickém stárnutí 5000 cyklů



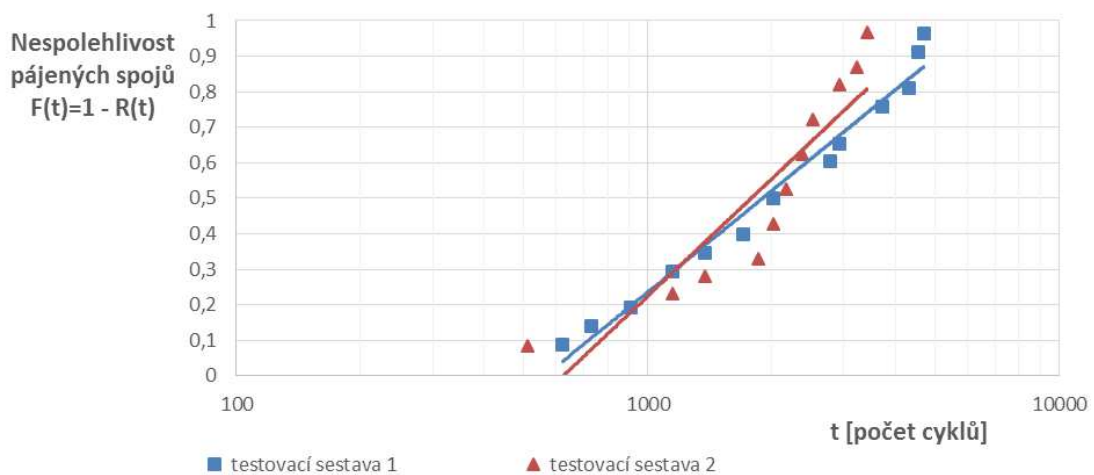
Obrázek 31: Detail testovací DPS po teplotním cyklickém stárnutí 5000 cyklů



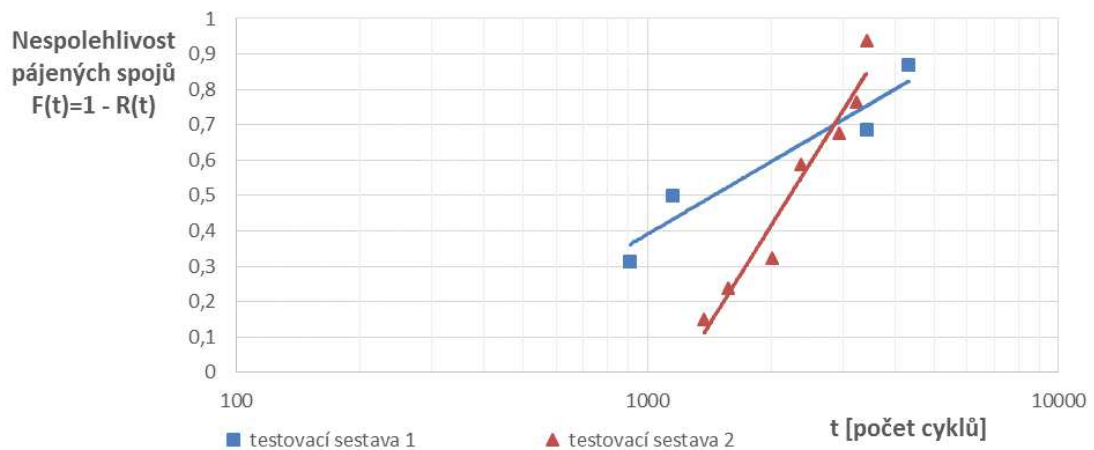


Obrázek 32: Detailní zobrazení testu elektrické vodivosti mezi pájecí ploškou a odkrytou vodivou cestou

Střední doby do poruchy byly u jednotlivých testovacích pouzder následující. Pro první testovací DPS sestavu, která obsahovala první sadu čtyř BGA pouzder, činily střední doby do poruchy 2422 cyklů, pro druhou 2141 cyklů. Zprůměrovaná hodnota středních dob do poruchy se rovná tedy 2281 cyklům. V těchto výsledcích jsou zahrnuta i nevodivá spojení, která nastala v průběhu celého testu, kdy byl porušen vodivý spoj mezi testovací deskou a komunikačním přípravkem. Nespolehlivost kulových pájkových vývodů včetně ručně pájených kabelových spojů v závislosti na cyklických testovacích cyklech je uvedena s Weibullovým rozdělením na grafu 3. Nespolehlivost v závislosti na počtu cyklických cyklů, která se zaměřuje pouze na kulové pájkové vývody, je zobrazena s Weibullovým rozdělením na grafu 4. Zde odpovídají střední doby do poruchy u první testovací DPS sestavy 2448 cyklům, u druhé testovací sestavy 2415 cyklům. Zprůměrovaná hodnota obou se rovná poté 2431 cyklů. Při porovnání středních dob do poruchy se průměrné hodnoty příliš neliší, avšak v důsledku výskytu nevodivých elektrických kontaktů ručně zapájených kabelových svazků došlo k brzkému výskytu poruch a to již u 500. cyklu a také k celkovému vysokému počtu těchto nevodivých elektrických spojení. U kulových pájkových vývodů došlo k prvnímu nevodivému elektrickému kontaktu až u 900. cyklu a významně klesl jejich výskyt.



Graf 3: Nespolehlivost všech pájených spojů v závislosti na počtu cyklických cyklů



Graf 4: Nespolehlivost pájkových kulových vývodů v závislosti na počtu cyklických cyklů

Pro srovnání zde uvedených a dosažených výsledků teplotního cyklického stárnutí pájkových kulových vývodů byla použita publikace [14], kde byla metoda přetavení pájkových kulových vývodů provedena pomocí horkovzduchu. Povrchová úprava zkušební BGA pouzdra byla OSP. Přetavení zkušebních pouzder probíhalo v konvenční peci v dusíkové atmosféře s vrcholovou teplotou 245 °C. Povrchová úprava testovací DPS sestavy byla Ni/Au. Rovněž byla použita pájecí slitina SAC305 s rozměry pájkových kuliček 16 mil (400 μm) s nastaveným cyklovacím teplotním profilem - 40/125 °C s délkou trvání cyklu 30 min. Průměrná uváděná charakteristická hodnota dosažených teplotních cyklů je rovna 794. Tato publikace také uvádí výsledky testování za teplotního profilu 0/100 °C s 90minutovými teplotními cykly. Konkrétně při 30minutovém setrvání na maximálních hranicích teplot s dobami náběhů 15 minut.

Sledované pouzdro CABGA 192 s roztečí kulových vývodů 0,8 mm vydrželo průměrně dané cyklování v délce 2554 cyklů a pouzdro CTBGA 84 s roztečí vývodů 0,5 mm následně až 5058 cyklů. Pájitelnou povrchovou úpravou obou pouzder bylo imerzní stříbro.

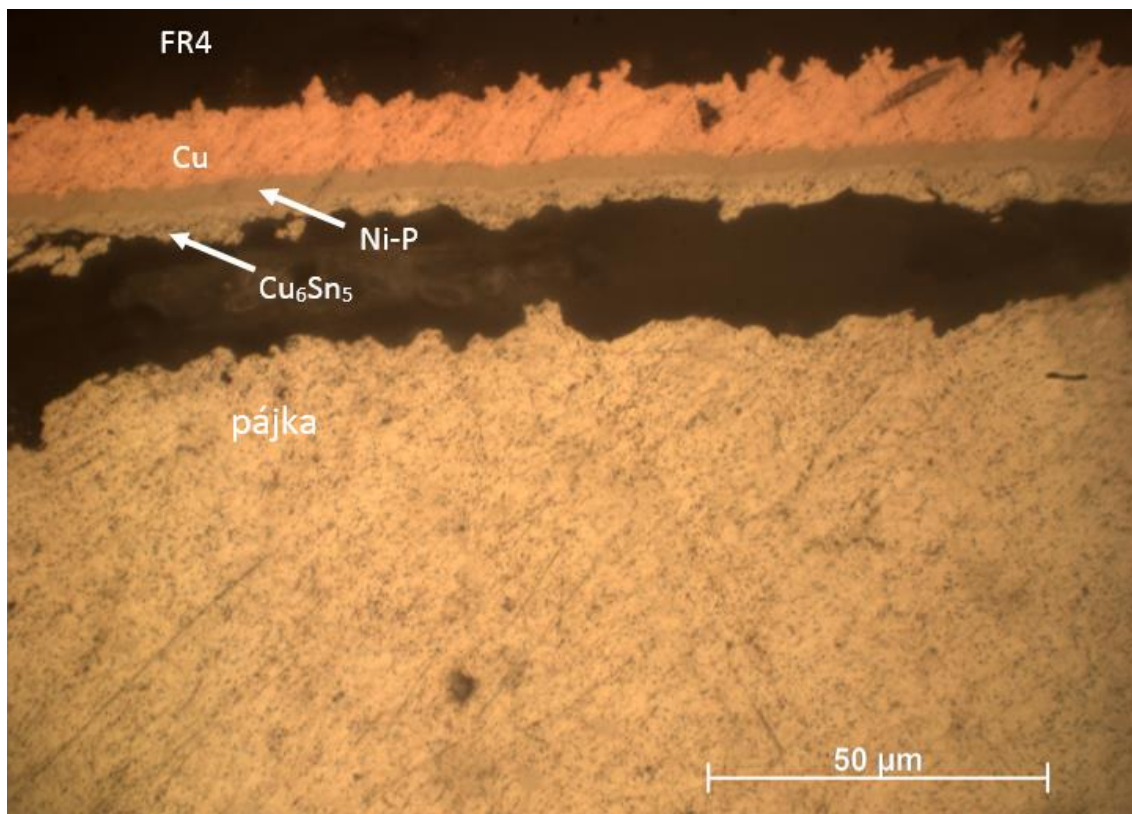
Následující srovnání vychází z publikace [13], kde byla teplotně cyklicky testována BGA pouzdra s definovaným teplotním profilem od - 40 °C do 125 °C s časy 30 minut při mezních teplotách a 15minutovými teplotními přechody. BGA pouzdra byla s rozměry 10 x 10 mm s roztečí 0,4 mm a s rozměry 15 x 15 mm s roztečí 0,8 mm. Použita byla slitina SAC305, povrchová úprava testovacích pouzder byla vrstva ENIG. Výsledné doby pro Weibullovo rozdělení zde byly uvedeny pro tzv. charakteristickou životnost, kdy se očekává selhání elektrické vodivosti zde pro 63,21 %. Charakteristická životnost byla 3974 cyklů pro BGA pouzdro s roztečí 0,4 mm, pro rozteč 0,8 mm byla rovna 3875 cyklům. Pokud bychom toto srovnání provedli na zde zkoumanou spolehlivost provedeného experimentu, charakteristický výsledek pro srovnání by činil 3050 cyklů.

## **4.4 Cyklické stárnutí a vliv na tloušťku intermetalické vrstvy a její drsnost**

Po provedeném cyklickém stárnutí a dalších analýzách elektrické vodivosti všech volně dostupných spojů dvou testovacích DPS, které byly osazeny osmi zkušebními BGA pouzdry, byly tyto testovací DPS rozřezány na původní jednotlivá BGA pouzdra, která byla zalita Dentacrylem pro další úpravy vzorků. Následně byl proveden stejný postup pro vyhotovení metalografických výbrusů s procesy leštění jako v kapitole 4.1 pro účely statistického určení tloušťky a efektivní drsnosti intermetalické vrstvy.

### **4.4.1 Analýza intermetalických vrstev**

Zpracované metalografické výbrusy byly podrobeny analýze zkoumání intermetalických vrstev. Sledována byla zejména oblast na rozhraní pájky a intermetalické vrstvy s chemickým složením  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Všechna rozhraní jsou zobrazena na obrázku 33. Bylo zde také zachyceno odtržení části pájkového kulového vývodu právě na intermetalickém rozhraní téměř po své celé délce. Dále byla stanovena intermetalická tloušťka a drsnost intermetalické vrstvy  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  pomocí počítačové analýzy v programu ImageJ s následným postupem, který popisuje kapitola 4.1.1.

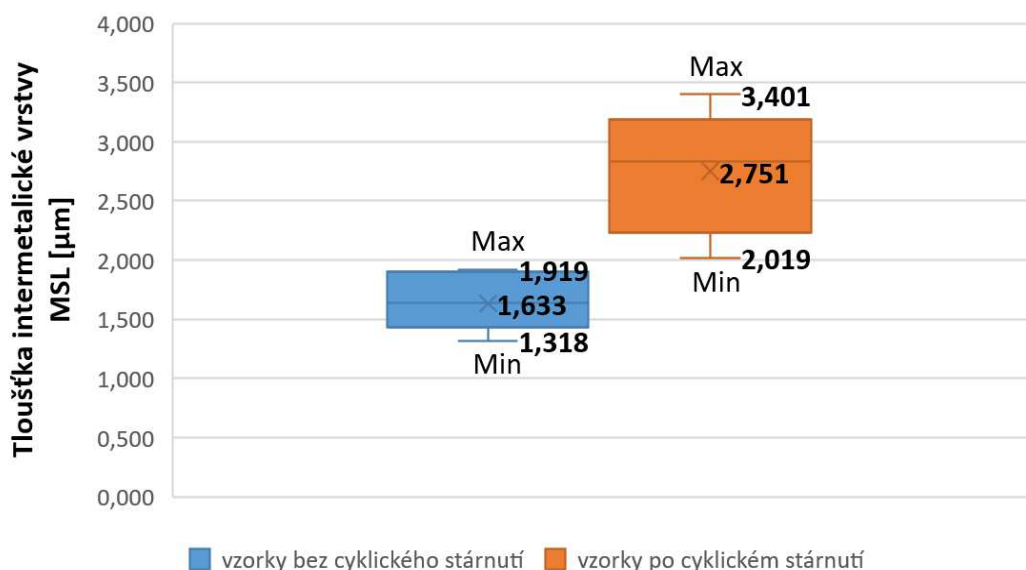


Obrázek 33: Oblast intermetalického rozhraní vzorku po cyklickém stárnutí pořízená mikroskopem se zvětšením 1000x

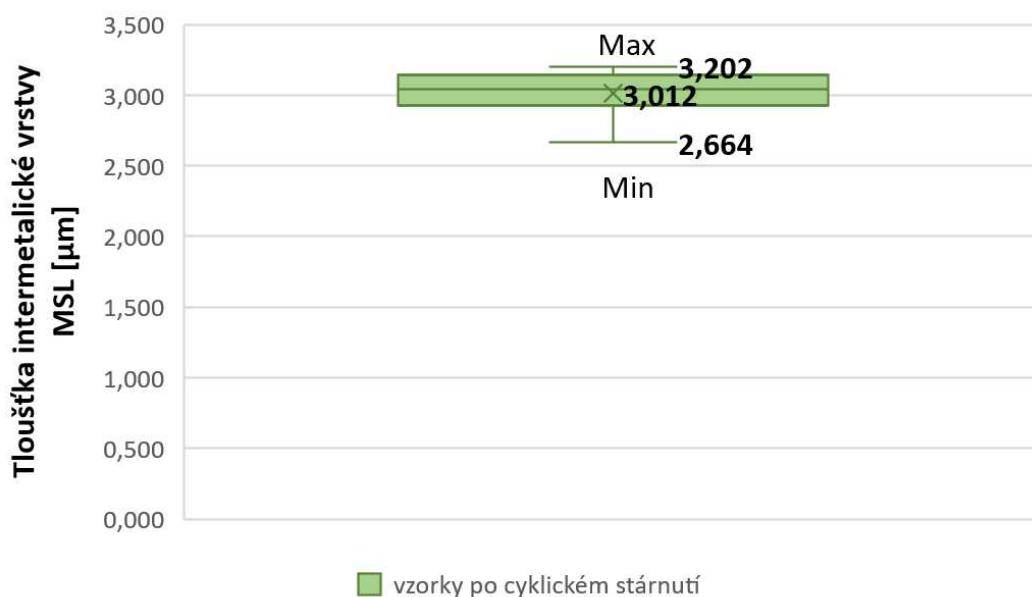
#### 4.4.2 Výsledky a vyhodnocení

Celkem bylo zhotoveno 8 vzorků BGA pouzder, ale vyhodnoceno bylo pro statistické zpracování 11 odečtů intermetalických vrstev a následných drsností, kdy byly provedeny standardní statistické t-testy se studentovým rozdělením. V grafu 5 jsou zobrazena výsledná data průměrné tloušťky intermetalické vrstvy u cyklicky nestárnutého a stárnutého vzorku. Graf zachycuje průměrnou, maximální a minimální tloušťku intermetalické vrstvy a také celkový rozptyl analyzovaných hodnot. Data pro nestárnuté vzorky byla použita z předchozího měření v bakalářské práci [12]. Graf 6 znázorňuje průměrnou hodnotu a rozptyl tloušťky intermetalických vrstev, které se týkaly intermetalických rozhraní zkušebních testovacích DPS. Průměrná tloušťka intermetalické vrstvy zkušebních testovacích desek je přibližně o 0,3 μm větší než na rozhraních se zkušebními BGA pouzdry.

Porovnání bylo uskutečněno s výsledky, které obsahuje publikace [13], kde je použita stejná povrchová úprava ENIG s metodou přetavení pájkových kulových vývodů pomocí horkovzduchu. Po 6měsíčním teplotním cyklováním při okrajových teplotách - 45/125 °C, bylo zjištěno, že průměrná tloušťka intermetalické vrstvy je 3,89 μm, oproti zde používané metodě přetavení pomocí přímo vyhřívané šablony, kde byla změřena průměrná tloušťka intermetalické vrstvy po skončení testu 2,751 μm.



Graf 5: Statistické srovnání tloušťky intermetalické vrstvy u cyklicky nestárnutého a stárnutého vzorku

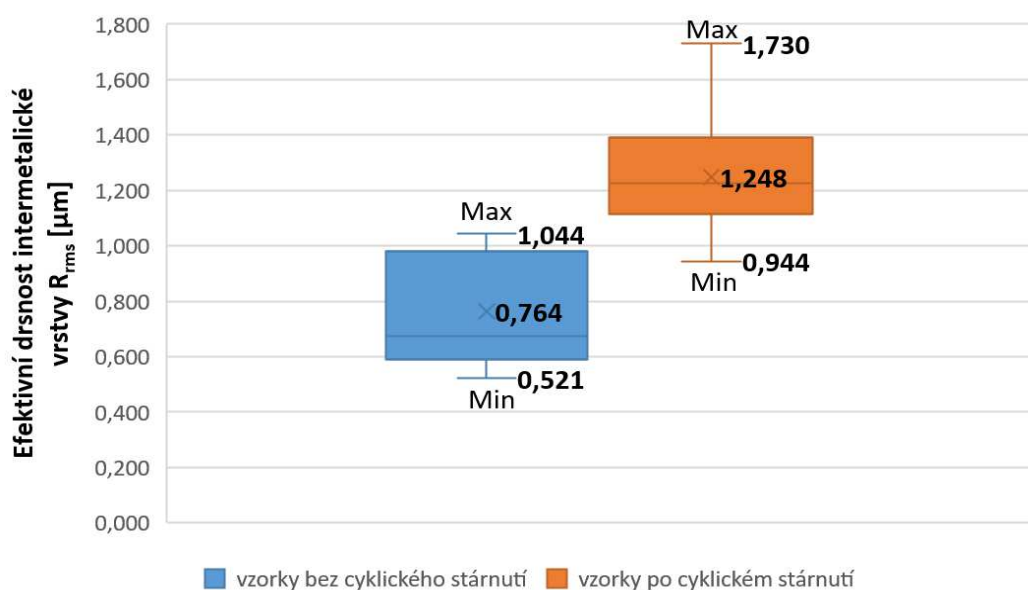


Graf 6: Statistické vyhodnocení tloušťky intermetalické vrstvy u cyklicky stárnutého vzorku

Statistické srovnání tloušťky efektivní drsnosti intermetalické vrstvy u cyklicky nestárnutého a stárnutého vzorku je uvedeno v grafu 7. V tomto grafu je zobrazen rozptyl hodnot drsností, minimální, maximální a také průměrná hodnota efektivní drsnosti. Data pro vzorky bez cyklického stárnutí byla použita z předchozího měření z mé bakalářské práce [12]. Srovnáním nestárnutého a stárnutého vzorku byl zjištěn nárůst průměrné efektivní drsnosti intermetalické vrstvy z hodnoty 0,764  $\mu\text{m}$  na hodnotu 1,248  $\mu\text{m}$ , což odpovídá rozdílu přibližně 0,5  $\mu\text{m}$ . Graf 8 vystihuje statistické vyhodnocení efektivní



drsnosti intermetalické vrstvy u cyklicky stárnutého vzorku, které se týkaly rozhraní u zkušebních testovacích DPS.



Graf 7: Statistické srovnání efektivní drsnosti intermetalické vrstvy u cyklicky nestárnutého a stárnutého vzorku

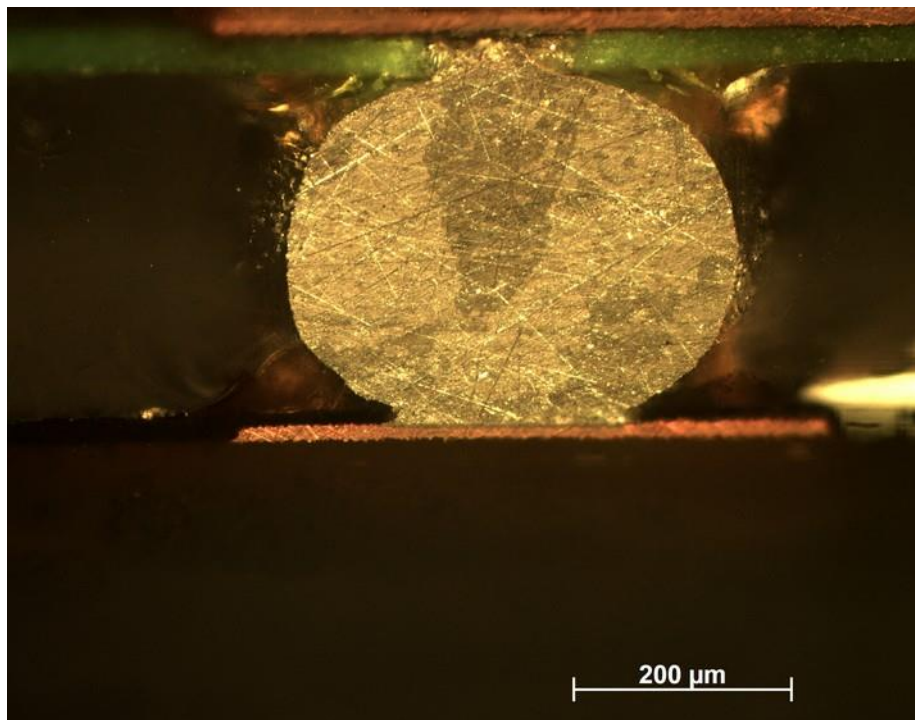


Graf 8: Statistické vyhodnocení efektivní drsnosti intermetalické vrstvy u cyklicky stárnutého vzorku

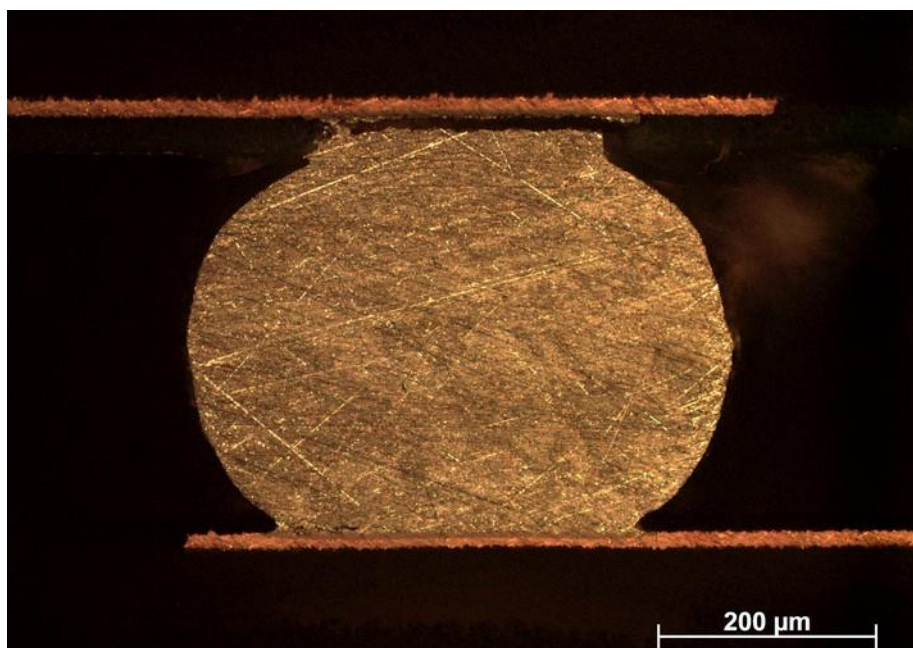
## 4.5 Cyklické stárnutí a vliv na počet a orientaci krystalografických rovin

K určení počtu a orientaci krystalografických rovin bylo nejprve provedeno leštění celkem osmi vzorků za pomoci diamantových lapovacích past od firmy Dimapa. Doleštění vzorků probíhalo ve čtyřech fázích stejným způsobem, jak je popsáno v kapitole 4.2. Následné optické zkoumání probíhalo opět na optickém mikroskopu Zeiss Axio Imager.M2m s nastaveným zvětšením 200x za použití polarizačního filtru, který slouží k zviditelnění morfologické struktury.

Jednotlivé morfologické struktury jsou vyobrazeny na obrázku 34 a obrázku 35. I zde bylo zachyceno odtržení části pájkového kulového vývodu právě na intermetalickém rozhraní, které se netýkalo zkušebního BGA pouzdra, ale testovací DPS z materiálu FR4 zelené barvy. Na obrázku 34 je vyobrazena vícezrnná struktura pájkového kulového vývodu, kde je rovněž částečně patrná tzv. struktura *Beach Ball*.



Obrázek 34: Vícezrnná struktura kulového pájkového spoje pořízená optickým mikroskopem se zvětšením 200x



Obrázek 35: Částečně prokládaná morfologie zrn cínu kulového pájkového spoje pořízená optickým mikroskopem se zvětšením 200x

Většina z analyzovaných vzorků po cyklických teplotních zkouškách měla dva až tři druhy odstínů šedi tj. zde jednotlivých krystalografických orientací. Publikace [14] uvádí velmi srovnatelné výsledky z oblasti zkoumání morfologických struktur při provedeném teplotním cyklování s podobnými parametry teplotního profilu a to od - 40 do 125 °C. Zde byly rovněž hojně zastoupeny grafické obrazy prokládaných morfologických struktur doložené ve zmiňované studii.

Morfologie kulových pájkových vývodů, které byly přetaveny inovativní metodou pomocí přímo vyhřívané šablony, vykazují dostatečné známky prokládaných a vícezrnných struktur a jeví se jako výhodné z pohledu odolnosti vůči teplotní roztažnosti a teplotnímu namáhání.

## 5. ZÁVĚR

V teoretické části této diplomové práce byly popsány důležité fyzikální procesy, které mají velký vliv na celkovou spolehlivost a životnost se zaměřením zejména na kulové pájené vývody. Jednalo se o procesy fyzikální difúze a korozivních a elektrochemických změn. Dále byla popsána vnitřní struktura BGA pájkových spojů a její dělení podle morfologické struktury. Byl uveden příklad změn ve vnitřní struktuře pájkových kulových vývodů ze slitiny SAC105 a příměsi po izotermickém stárnutí. Z experimentu vyplývá, že po teplotním procesu testování životnosti pájených spojů a zkoušek izotermického a cyklického stárnutí se po stárnutí zvětšilo procentuální zastoupení vícevrstvé struktury u všech zkoumaných slitin.

Bylo učiněno nastavení metodologie pro zjištění životnosti pájených spojů u BGA pouzder se zaměřením na vnitřní strukturu těchto pájených spojů, která byla následně zkoumána. Zhotovení zkušebních testovacích vzorků BGA pouzder bylo provedeno pomocí inovativního zařízení HSR-01 při zvolené výšce 250  $\mu\text{m}$  přímo vyhříváné šablony nad pouzdem BGA. Vzorky BGA pouzder byly osazeny a zapájeny k testovacím DPS, obsahují *Daisy Chain* motiv sloužící k možnosti testování vodivého propojení. Testovací vzorky BGA pouzder, které byly osazeny na testovací DPS, byly podrobeny cyklickému stárnutí v zařízeních k tomu určených podle definovaných parametrů, které obsahuje tato práce.

V experimentální části diplomové práce byly podrobeny testovací vzorky izotermickému stárnutí při teplotě 125  $^{\circ}\text{C}$  po dobu 350 h. Výsledky provedených izotermických zkoušek byly následně statisticky zpracovány. Hodnoty průměrné tloušťky intermetalické vrstvy  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  u nestárnutých vzorků byly rovny 1,635  $\mu\text{m}$  oproti 1,883  $\mu\text{m}$  u vzorků stárnutých po dobu 350 h při teplotě 125  $^{\circ}\text{C}$ . Publikace [11] uvádí hodnoty tloušťky intermetalické vrstvy 2,5  $\mu\text{m}$  pro nestárnuté vzorky a 2,8  $\mu\text{m}$  pro vzorky stárnuté. Nárůst této intermetalické vrstvy způsobený izotermickým stárnutím činil přibližně 0,3  $\mu\text{m}$  u obou zde porovnaných analýz izotermického stárnutí. V publikaci [16] činil nárůst intermetalické vrstvy do 1  $\mu\text{m}$ , rovněž při stejných podmínkách izotermického stárnutí. Srovnáním nestárnutého a stárnutého vzorku byl zjištěn nárůst průměrné efektivní drsnosti intermetalické vrstvy z hodnoty 0,764  $\mu\text{m}$  na hodnotu 1,700  $\mu\text{m}$ , což odpovídá rozdílu nárůstu přibližně 1  $\mu\text{m}$ .

Dále byla provedena analýza tloušťky intermetalické vrstvy po provedeném cyklickém stárnutí v rozsahu teplot - 20/125  $^{\circ}\text{C}$  s celkovým počtem 5000 cyklů. Hodnoty průměrné tloušťky intermetalické vrstvy  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  u nestárnutých vzorků byly rovny 1,635  $\mu\text{m}$  oproti 2,751  $\mu\text{m}$  u vzorků cyklicky stárnutých. Publikace [13] uvádí průměrnou tloušťku intermetalické vrstvy 3,89  $\mu\text{m}$  při zkušebním teplotním profilu - 45/125  $^{\circ}\text{C}$ . Srovnáním nestárnutého a stárnutého vzorku byl zjištěn nárůst průměrné efektivní drsnosti intermetalické vrstvy z hodnoty 0,764  $\mu\text{m}$  na hodnotu 1,248  $\mu\text{m}$ , což odpovídá rozdílu přibližně 0,5  $\mu\text{m}$ .

Střední doby do poruchy při cyklickém teplotním testování činily u první testovací DPS sestavy 2448 cyklů, u druhé testovací sestavy 2415 cyklů. Zprůměrovaná hodnota obou se rovná poté 2431 cyklům. Důležitým zkoumáním bylo rovněž vodivé spojení mezi pájecími ploškami a vodivými cestami. Toto zkoumání odhalilo vysoký počet defektů na rozhraní pájecí plošky, pájecí slitiny a kabelového přívodu, a tím docházelo k počátečním elektrickým nevodivostem. Publikace [14] uvádí průměrný dosažený počet teplotních cyklů 794 při cyklovacím teplotním profilu - 40/125 °C s délkou trvání cyklu 30 min. Použitá metoda pájení zkušební DPS byla v konvenční peci v dusíkové atmosféře s vrcholovou teplotou 245 °C a povrchovou úpravou testovací DPS sestavy Ni/Au. Ve spolehlivostních zkouškách uvedených v této práci bylo rovněž popsáno porovnání vzhledem k jiným teplotním profilům.

Metoda přetavení přímo vyhřívanou šablonou se může jevit jako spolehlivá vzhledem k četným defektům odtržení části pájkových kulových vývodů v oblasti intermetalického rozhraní, které se týkaly zkušebních testovacích DPS a ne zkušebních BGA pouzder. To mohlo být způsobeno právě zjištěnou průměrnou tloušťkou intermetalických vrstev u zkušebních testovacích desek, která byla přibližně o 0,3  $\mu\text{m}$  větší než na rozhraních se zkušebními BGA pouzdry a rovněž nastavením a celkovým rozpoštěním teplot při druhém přetavení BGA pouzder na zkušební testovací DPS.

Diplomová práce také podrobně zkoumala vnitřní strukturu pájkových kulových vývodů a počet krystalografických rovin. Většina z analyzovaných vzorků po izotermickém stárnutí a cyklických teplotních zkouškách měla dva až tři druhy odstínů šedi tj. zde jednotlivých krystalografických orientací. Morfologie pájkových kulových vývodů, které byly přetaveny inovativní metodou pomocí přímo vyhřívané šablony, vykazovala dostatečné známky prokládaných a vícevrstvných struktur a jeví se jako výhodná z pohledu odolnosti vůči teplotní roztažnosti a teplotnímu namáhání.

## LITERATURA

- [1] SZENDIUCH, I. *Pájení a bezolovnaté pájky* [online]. In: . [cit. 2021-3-10]. Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [2] PÍCHA, J. *Studium spolehlivosti bezolovnatého pájení* [online]. Brno, 2010 [cit. 2021- 3- 10]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27814](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27814). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.
- [3] Memmert Oven Oven Laboratory Equipment. Evergreen Engineering & Resources [online]. [cit. 2021-3-10]. Dostupné z: [http://m.evergreensel.com.my/index.php?ws=showproducts&products\\_id=1851823](http://m.evergreensel.com.my/index.php?ws=showproducts&products_id=1851823)
- [4] KOPÁČIK, J. *Zkoušky spolehlivosti pájených spojů* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-3-11]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89874/F3-BP-2020-Kopacik-Jan-Zkousky%20spolehlivosti%20pajenych%20spoju.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Veselý.
- [5] Profcontrol.de. *CTS T-40/25 Climate Temperature Chamber Cabinet 25 L Klimaprüfschrank 230V 2009* [online]. [cit. 2021-3-11]. Dostupné z: <https://profcontrol.de/CTS-T-40-25-Climate-Temperature-Chamber-Cabinet-25-L-Klimapruefschrank-230V-2009>
- [6] OTÁHAL, A. *Výzkum jakosti pájených spojů u pouzder BGA a QFN* [online]. Brno, 2012 [cit. 2021-3-11]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/8349/final-thesis.pdf?sequence=10&isAllowed=y>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [7] ZIYU, L. *Interfacial Reaction Between Sn3.0Ag0.5Cu Solder and ENPIG for Fine Pitch BGA by Stencil Printing*. Semantic Scholar [online]. 2014 [cit. 2022-5-1]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Interfacial-Reaction-Between-Sn3.0Ag0.5Cu-Solder-by-Liu-Cai/a44dada0f41db814335effd5acf9452717f9ae00>
- [8] OTÁHAL, A. *Optimalizace faktorů ovlivňujících proces pájení moderních elektronických pouzder* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-3-12]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=218337](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=218337). Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.
- [9] COYLE, R.; PARKER, R.; ARFAEI, B.; MUTUKU, F.; SWEATMAN, K.; HOWELL, K.; LONGGOOD, S.; BENEDETTO, E. *The effect of nickel microalloying on thermal fatigue reliability and microstructure of SAC105 and SAC205 solders. Proceedings – Electronic Components and Technology*

- Conference*. [online]. 2014 [cit. 2021-3-15]., s. 425-440. DOI: 10.1109/ECTC.2014.6897320.
- [10] YU, CHI-KO; CHANG, GRAVER; SHAO, TINA; CHEN, CHERIE; LEE, JEFFREY. *Investigation of Recrystallization in BGA Package to Evaluate the Low Ag Solder With Different Dopants After Board Level Test*. [online]. 2010 [cit. 2021-3-20]., DOI: 10.1109/ICEPT.2010.5582723.
- [11] CHOUBEY, A., H. YU a M. OSTERMAN., et al. *Intermetallics Characterization of Lead-Free Solder Joints under Isothermal Aging*. *Journal of Elec Materi* [online]. 2008(37), s. 1130–1138 [cit. 2021-4-15]. DOI: 10.1007/s11664-008-0466-8
- [12] GREGOR, A. *Výzkum vlivu nové metody pro vytvoření kulových pájkových vývodů BGA pouzder na intermetalické vrstvy* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=216728](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=216728). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.
- [13] SHEN, Ch., Z. HAI, C. ZHAO a J. ZHANG. *Reliability Analysis of Aging in Joint Microstructures for Sn-Ag-Cu Solder Joints During Thermal Cycling* [online]. 2015 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: doi:10.1115/IPACK2015-48009
- [14] ARFAEI, B., S. MAHIN-SHIRAZI, S. JOSHI a M. ANSELM., et al., *Reliability and failure mechanism of solder joints in thermal cycling tests*. IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference [online]. 2003, s. 976-985 [cit. 2021-4-20]. DOI: 10.1109/ECTC.2013.6575693
- [15] OTÁHAL, A. a SZENDIUCH, I. *Influence of heat flow direction on solder ball interfacial layer* [online]. 2018 [cit. 2021-4-20]. ISSN 1339-309X
- [16] NIE, L. *Temperature cycling reliability of reballed and reworked ball grid array packages in SnPb and SAC assembly* [online]. 2010 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: [https://drum.lib.umd.edu/bitstream/handle/1903/10267/Nie\\_umd\\_0117E\\_11095.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://drum.lib.umd.edu/bitstream/handle/1903/10267/Nie_umd_0117E_11095.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Dissertation. University of Maryland. Vedoucí práce Prof. Michael G. Pecht.