

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



**Spolehlivostní analýza pájených spojů s ohledem  
na typ vývodů součástek a typ nosného substrátu**

**Reliability Analysis of Solder Joints with Respect to Type  
of Component Lead and Type of Support Substrate**

Diplomová práce

Master's thesis

Bc. Anna Kadlecová

Praha 2022

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

Vedoucí práce: Ing. Petr Veselý, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kadlecová** Jméno: **Anna** Osobní číslo: **474774**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Technologické systémy**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Spolehlivostní analýza pájených spojů s ohledem na typ vývodů součástek a typ nosného substrátu**

Název diplomové práce anglicky:

**Reliability Analysis of Solder Joints with Respect to Type of Component Lead and Type of Support Substrate**

Pokyny pro vypracování:

1. Provedte rešerši na tématiku pájení přetavením, zaměřte se na spolehlivost pájených spojů a diagnostické nástroje. Shrňte dosavadní poznatky v oblasti spolehlivosti pájených spojů na různých nosných substrátech.
2. Navrhněte a proveďte experiment pro ověření vlivu typu substrátu a vývodů součástek na spolehlivost pájených spojů, která bude sledována během teplotních šokových zkoušek.
3. Výsledky experimentu vyhodnoťte. Vyvodte závěry do praxe.

Seznam doporučené literatury:

- [1] PIETRIKOVÁ, Alena, ĎURIŠIN, Juraj a MACH, Pavel. Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike. 1. vyd. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [2] LEE, Tae-Kyu. Fundamentals of lead-free solder interconnect technology: from microstructures to reliability. 1. vyd. New York: Springer, 2014. ISBN 978-1-4614-9265-8.
- [3] HUMPSTON, Giles a JACOBSON, David M. Principles of Soldering. 1. vyd. ASM International, 2004. ISBN 978-0-87170-792-5.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Petr Veselý, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL**

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

Datum zadání diplomové práce: **26.01.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

Ing. Petr Veselý, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne .....

.....  
Anna Kadlecová

## **Poděkování**

Tato práce by nevznikla bez podpory, kterou jsem dostala od své milující rodiny. Tímto bych chtěla poděkovat především jim, za to, že za mnou stáli, měli se mnou trpělivost a dávali mi skvělé rodinné zázemí po celou dobu mého studia. Mé díky patří samozřejmě i mému skvělému vedoucímu práce Ing. Petru Veselému, PhD., který se o mne staral a pomáhal mi již během vypracovávání bakalářské práce. Poděkovat bych chtěla i Ing. Martinovi Plačkovi, PhD., bez jehož pomoci bych nedokázala udělat výbrusy v tak kvalitní formě.

# Abstrakt

Tato práce se zabývá analýzou spolehlivosti pájených spojů na různých druzích nosných substrátů desek plošných spojů a na odlišných typech vývodů součástek v závislosti na počtu cyklů v teplotní šokové komoře. Celkem bylo využito pět diagnostických nástrojů na zhodnocení spolehlivosti spojů. První metodikou bylo měření elektrického odporu, a to jednak kontinuálně během šokové zkoušky a následně po jejím skončení. Dalším nástrojem na určení spolehlivosti byla konfokální mikroskopie, pomocí které se zjišťovaly defekty na jednotlivých spojích. Tato analýza byla doplněna o skenovací elektronovou mikroskopii, kterou se stanovovaly šířky intermetalických vrstev na rozhraní pájeného spoje a pájecí plošky. Následně se u spojů zjišťovala jejich pevnost ve smyku a jako poslední byla provedena termomechanická analýza, jež sloužila k určení koeficientu teplotní roztažnosti a teplotě skelného přechodu jednotlivých substrátů. Největší degradace pájených spojů nastala vlivem tepelných šoků u „bezvývodového“ typu pouzdra součástek na sklolaminátovém epoxidovém substrátu s hliníkovou základnou, která se projevila vysokou hodnotou elektrického odporu spojů, výskytem rozsáhlých trhlin ve spojích, strmým nárůstem šířky IMC vrstvy a sníženou pevností ve smyku. Naopak, největší odolnost vykazovaly spoje na klasickém substrátu FR4.

## Klíčová slova

Defekty pájených spojů, konfokální mikroskopie, pevnost ve smyku, skenovací elektronová mikroskopie, termomechanická analýza, zkouška teplotním šokem.

# **Abstract**

This thesis deals with the analysis of the reliability of soldered joints on different types of PCB substrates and different types of component terminals depending on the number of cycles in the thermal shock chamber. Five diagnostic tools were used to evaluate the reliability of the joints. The first methodology was the measurement of electrical resistance during and after the shock test. Another tool used to determine reliability was confocal microscopy, which was used to detect defects at individual joints. This analysis was supplemented by scanning electron microscopy to determine the widths of the intermetallic layers at the interface between the solder joint and the solder pad. Subsequently, the joints were examined for their shear strength. Lastly, a thermomechanical analysis was performed to determine the coefficient of thermal expansion and glass transition temperature of the individual substrates. Solder joints of the "lead-free" type of component package on a fiberglass epoxy substrate with an aluminum base suffered the greatest degradation due to thermal shocks, resulting in a high value of electrical resistance of the joints, an appearance of extensive cracks in the joints, a steep increase in the width of the IMC layer and reduced shear strength. On the contrary, the joints on the classic FR4 substrate showed the greatest resistance.

# **Keywords**

Solder joint defects, confocal microscopy, shear strength, scanning electron microscopy, thermomechanical analysis, thermal shock test.

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	10
Úvod .....	13
<b>1 Teoretická úvodní část.....</b>	<b>14</b>
1.1 Pájení přetavením.....	14
1.1.1 Metody pájení přetavením.....	15
1.1.1.1 Ohřev konvekcí .....	16
1.1.1.2 Ohřev kondukcí.....	17
1.1.1.3 Ohřev kondenzací par.....	17
1.1.1.4 Ohřev laserem .....	17
1.1.1.5 Ohřev infračervenými zářiči.....	18
1.2 Pájka.....	18
1.2.1 Intermetalická vrstva.....	19
1.2.2 Tavidlo .....	19
1.2.3 Depozice pájky.....	20
1.2.4 Bezolovnaté pájecí slitiny .....	21
1.3 Pouzdra SMD součástek .....	22
1.3.1 Pouzdra typu SO .....	23
1.3.2 Pouzdra typu FP .....	23
1.3.3 Pouzdra typu CC .....	24
1.3.4 Pouzdra typu GA.....	24
1.3.5 Pouzdra typu CS.....	25
1.4 Desky plošných spojů .....	25
1.4.1 Nosný substrát.....	25
1.4.1.1 Organické pevné substráty .....	26
1.4.1.1.1 Fenolformaldehydové lamináty .....	26
1.4.1.1.2 Epoxidové lamináty .....	26
1.4.1.1.3 Polyesterové lamináty .....	27
1.4.1.1.4 Polyamidové lamináty.....	27
1.4.1.1.5 Polytetrafluoretylenové lamináty (PTFE).....	27
1.4.1.2 Organické flexibilní substráty .....	27
1.4.1.2.1 Polyimidové lamináty (PI).....	27
1.4.1.2.2 Polyethylentereftalátové lamináty (PET).....	28
1.4.1.2.3 Polyetylénnaftalátové lamináty (PEN).....	28
1.4.1.3 Anorganické substráty.....	28
1.4.2 Povrchová úprava DPS .....	28

1.4.2.1	ENIG .....	29
1.4.2.2	HAL.....	29
1.4.2.3	OSP .....	30
1.4.2.4	I-Sn.....	30
1.4.2.5	I-Ag .....	30
<b>2</b>	<b>Spolehlivost pájených spojů .....</b>	<b>31</b>
2.1	Diagnostické spolehlivostní nástroje.....	31
2.1.1	Zkoušky teplotním šokem.....	32
2.1.2	Mechanická zkouška smykem.....	33
2.1.3	Měření elektrického odporu dvoubodovou a čtyřbodovou metodou .....	34
2.1.4	Konfokální mikroskopie.....	35
2.1.5	Skenovací elektronová mikroskopie .....	35
2.2	Defekty pájených spojů.....	36
2.2.1	Studený spoj .....	36
2.2.2	Nesmáčení.....	36
2.2.3	Odsmačení.....	37
2.2.4	Head-in-pillow defekt .....	37
2.2.5	Trhliny ve spojích a v laminátu.....	38
2.2.6	Efekt náhrobního kamene .....	39
2.2.7	Dendrity .....	39
2.2.8	Voidy.....	40
2.2.9	Whiskery .....	40
2.2.10	Kuličky pájky.....	41
<b>3</b>	<b>Experimentální část .....</b>	<b>42</b>
3.1	Cíl, motivace a průběh experimentu .....	42
3.2	Příprava experimentu .....	43
3.2.1	Zkoumané objekty.....	43
3.2.2	Zhotovení výbrusů .....	47
3.3	Parametry experimentálních metod.....	48
3.3.1	Zkouška teplotním šokem .....	48
3.3.2	Měření elektrického odporu .....	49
3.3.3	Konfokální a skenovací elektronová mikroskopie .....	49
3.3.4	Měření pevnosti ve smyku .....	50
3.3.5	Termomechanická analýza.....	52
3.4	Výsledky experimentu .....	54
3.4.1	Průběh elektrického odporu během cyklování .....	54
3.4.2	Elektrické odpory pájených spojů po cyklování .....	56



3.4.3	Vizuální zhodnocení spojů.....	58
3.4.4	Šířka IMC vrstvy.....	60
3.4.5	Pevnost spojů ve smyku .....	62
3.4.6	Expanzní křivky substrátů.....	63
3.4.7	Koeficient teplotní roztažnosti substrátů.....	64
3.4.8	Teplota skelného přechodu FR4 substrátů .....	66
3.5	Diskuse a závěr experimentu .....	67
<b>Závěr práce .....</b>		<b>70</b>
<b>Zdroje.....</b>		<b>72</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>		<b>78</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>		<b>79</b>
<b>Seznam grafů .....</b>		<b>79</b>
<b>Přílohy .....</b>		<b>I</b>
	Příloha A .....	I
	Příloha B .....	III
	Příloha C .....	IX
	Příloha D .....	X

## Seznam použitých symbolů a zkratek

AL	deska plošného spoje se základovým materiálem hliníkem
BGA	<i>Ball Grid Array</i> – pouzdro integrovaného obvodu vyznačující se kontakty v pravidelné mřížce s nanesenými vodivými kuličkami
BT	bismaleinimidový laminát
C	kondenzátor
CC	<i>Chip Carrier</i> – nosič čipů pro jejich montáž
CE	kyanátsterový laminát
CEM	<i>Composite Epoxy Material</i> – kompozitní epoxidový materiál
CLCC	<i>Ceramic Lead-less Chip Carrier</i> – keramický nosič čipů s vývody, použití pro povrchovou montáž
CS	<i>Chip Scale</i> – provedení pouzder součástek pro povrchovou montáž, kdy je velikost pouzdra srovnatelná s velikostí součástky
CSP	<i>Chip-Scale Package</i> – pouzdro s kuličkovými vývody součástek pro povrchovou montáž, kdy je velikost pouzdra srovnatelná s velikostí
CTE	<i>Coefficient of Thermal Expansion</i> – Koeficient tepelné roztažnosti
DPS	deska plošného spoje
ENIG	<i>Electroless Nickel/Immersion Gold</i> – typ povrchové úpravy založené na imerzním pokovování zlatem
F	maximální síla na odtržení součástky při zkoušce pevnosti ve smyku
FP	<i>Flat Pack</i> – provedení pouzder součástek pro povrchovou montáž s malou roztečí mezi vývody
FR	deska plošného spoje se základovým materiálem tvrzenou skelnou tkaninou (sklotextit)
GA	<i>Grid Array</i> – pouzdra součástek pro povrchovou montáž s mřížkovým uspořádáním vývodů
GPO	<i>Glass Polyester Laminate</i> – skleněný polyesterový laminát
GW	<i>Gull Wing</i> – typ vývodu součástky tvaru „racího křídla“
HAL	<i>Lead-free Hot Air Leveling</i> – typ povrchové úpravy založené na nanesení roztaveného cínu
HiP	<i>Head-in-Pillow</i> – defekt pájeného spoje, který se dle tvaru označuje jako „hlava na/v polštáři“
I-Ag	<i>Immersion Silver</i> – typ povrchové úpravy založené na imerzním pokovování stříbrem
IMC	<i>Intermetallic Compound</i> – intermetalická vrstva

IPC	<i>The Institute of Printed Circuit</i>
IR	<i>Inorganic</i> – tavidlo na bázi anorganické kyseliny
I-Sn	<i>Immersion Tin</i> – typ povrchové úpravy založené na imerzním pokovování cínem
J	typ vývodu součástky, který má tvar písmene J
LGA	<i>Land Grid Array</i> – pouzdro součástek pro povrchovou montáž, podobné BGA, avšak místo kuličkových vývodů jsou na pouzdru kontaktní plošky
MID	<i>Molded Interconnect device</i> – lisované propojovací zařízení
OR	<i>Organic</i> – tavidlo na bázi organické kyseliny
OSP	<i>High Temperature Organic Solderability Preservative</i> – typ povrchové úpravy založené na organických inhibitorech oxidace
PEN	polyetylénnaftalátový laminát
PET	polyetyléntereftalátový laminát
PI	polyimidový laminát
PLCC	<i>Plastic Leaded Chip Carrier</i> – plastický nosič čipů s vývody, použití pro povrchovou montáž
PTFE	polytetrafluoretylenový laminát
QFJ	<i>Quad Flat J-leaded Package</i> – pouzdro součástek pro povrchovou montáž s vývody typu J na všech stranách pouzdra
QFN	<i>Quad Flat Non-leaded Package</i> – „bezvývodové“ pouzdro součástek pro povrchovou montáž s vývody na všech stranách pouzdra
QFP	<i>Quad Flat Package</i> – pouzdro součástek pro povrchovou montáž s vývody typu „rací křídlo“ na všech stranách pouzdra
R	rezistor/el. odpor
RE	<i>Resin</i> – tavidlo na bázi přírodní pryskyřice
RO	<i>Rosin</i> – tavidlo na bázi syntetické pryskyřice
RoHS	<i>Restriction of Certain Hazardous Substances</i> – směrnice pro omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních
SAC	slitina cínu, stříbra a mědi
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i> – skenovací elektronová mikroskopie
SMD	<i>Surface Mount Device</i> – součástka pro povrchovou montáž
SMT	<i>Surface Mount Technology</i> – technologie povrchové montáže
SO	<i>Surface Mount Small Outline Packages</i> – pouzdra pro povrchovou montáž součástek malých rozměrů
SOJ	<i>Small Outline J-leaded package</i> ) – pouzdro malého rozměru s vývody typu J, použití pro povrchovou montáž
SON	<i>Small Outline Non-leaded Package</i> – pouzdro malého rozměru s vývody umístěnými přímo na pouzdru, použití pro povrchovou montáž

SOP	pouzdro malého rozměru, s vývody typu „rací křídlo“, použití pro povrchovou montáž
THT	<i>Through-hole Technology</i> – technologie osazení desky plošného spoje součástkami s drátovými vývody
t/T	teplota
$T_g$	teplota skelného přechodu
$t_T$	teplota tání
TMA	termomechanická analýza
WEEE	<i>Waste Electrical and Electronic Equipment Legislations</i> – směrnice o odpadních elektrických a elektronických zařízeních
XPC	<i>Phenolic Laminate</i> – fenolický laminát
$\alpha$	koeficient teplotní roztažnosti
$\sigma$	směrodatná odchylka
$\tau$	čas

# Úvod

Spolehlivost pájených spojů je jedním z nejdůležitějších aspektů elektrických a elektronických zařízení, které zajišťují správnou funkci a dlouhodobou životnost zařízení. Analýzu takovéto spolehlivosti lze provést z mnoha hledisek. Většina odborných prací na tuto tematiku nejsou však dostatečně komplexní. Výzkumy spolehlivosti jsou převážně provedeny pouze pro jeden druh nosného substrátu či jeden typ vývodu součástky. Avšak pro návrh spolehlivého zařízení do klimaticky náročnějšího prostředí by byla komplexní studie velmi užitečná. Zmíněná fakta byla hlavní motivací pro napsání této diplomové práce, jejíž cílem je analýza spolehlivosti pájených spojů z hlediska různých druhů substrátů a vývodů SMD součástek v závislosti na počtu cyklů v teplotní šokové komoře.

Práce se skládá ze tří hlavních částí – dvou teoretických a jedné experimentální. V první části jsou uvedeny a vysvětleny pojmy vztahující se k experimentální části, jakož je problematika pájení přetavením, typy pouzder a vývodů SMD součástek, nosné substráty DPS a povrchová úprava DPS. Druhá část definuje spolehlivost pájených spojů a dále uvádí možnosti její diagnostiky a různé defekty spojů. V experimentální části jsou blíže představeny zkoumané objekty, parametry experimentálních metod a získané výsledky.

Diagnostika spolehlivosti pájených spojů byla provedena na třech typech nosných substrátů DPS s povrchovou úpravou OSP – FR4, PI a AL. U substrátu FR4 se navíc zkoumala i povrchová úprava HAL. Dále bylo mezi sebou porovnáváno pět druhů pouzder – R, MLCC, SOIC, PLCC a VSON – s třemi typy vývodů – „bezvývodový“ typ, GW a J typ.

Spolehlivost byla zkoumána pomocí pěti různých diagnostických metod. Nejprve byl během šokové zkoušky měřen el. odpor na jednotlivých sadách sériově zapojených rezistorů. Po skončení šoků byl el. odpor změřen na jednotlivých pájených spojích rezistorových součástek. Pomocí konfokální mikroskopie byly zhotoveny snímky pájených spojů a z nich identifikovány defekty na spojích všech typů vývodů pouzder. Následně byly při velkém zvětšení pořízeny na skenovacím elektronovém mikroskopu snímky IMC vrstev mezi rozhraními pájených spojů rezistorů a pájecích plošek DPS, ze kterých se stanovila šířka IMC. Dalším diagnostickým nástrojem bylo měření pevnosti pájených spojů na rezistorech ve smyku. Jako poslední byla provedena termomechanická analýza, jenž sloužila k určení koeficientu teplotní roztažnosti a teploty skelného přechodu jednotlivých substrátů. Každá z těchto diagnostik byla dána do korelace s různým počtem cyklů v šokové komoře.

# 1 Teoretická úvodní část

Jak již bylo zmíněno v úvodu, cílem práce je analýza pájených spojů. Pájený spoj je druh trvalého, mechanicky pevného a dlouhodobě spolehlivého vodivého spojení kovových či pokovených materiálů, jehož podstatou vzniku je chemická reakce nejčastěji mezi mědí a cínem za vzniku intermetalických sloučenin. Pájený spoj se vytvoří procesem zvaným pájení, během něhož probíhá rozpuštění a difúze některých prvků v pájce a spojovaných částí. Pájení součástek, kterým se tato práce zabývá, spadá do oblasti měkkého pájení, které se vyznačuje pracovní teplotou do 450 °C [1, 2].

Pájecí proces můžeme dělit na ruční a strojní. V průmyslu se využívá především pájení strojní, které můžeme dle typu technologie dále členit na pájení vlnou (*Flow*) a pájení přetavením (*Reflow*) [3].

Praktická část této práce je zaměřená na pájení přetavením, z toho důvodu je v dalších odstavcích popsán pouze tento typ pájení. Je zde rozebrán princip pájení přetavením, používané technologie, materiály pájek, tavidel, DPS (desky plošných spojů), a typy pouzder součástek s různými vývody pro uvedení čtenáře do souvislostí s praktickou částí práce.

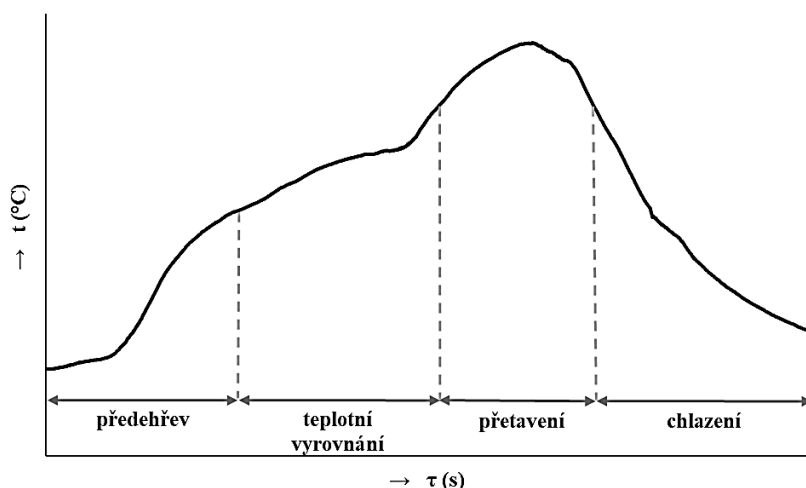
## 1.1 Pájení přetavením

Pájení přetavením je jedna z metod pájení, která má využití především u SMD (*surface mount devices*) součástek, kde jsou součástky vedle sebe hustě osazené, a tedy i více náchylné na vznik nežádoucích vodivých můstků mezi součástkami. K tomuto pájení se používá pájka ve formě pájecí pasty, která se nanese na místa požadovaných spojů pomocí šablonového tisku, sítotisku či dispenzerem. Tato místa se osadí součástkami, které jsou následně připájeny k povrchu DPS pomocí přetavení pájecí pasty. Výhodou pájení přetavením je, že se součástky vlivem povrchového napětí roztavené pájecí pasty samy vystředí a to eliminuje určité chyby vzniklé nepřesným osazením [4, 5].

Proces pájení přetavením se skládá ze čtyř fází – předehřev, smáčení, přetavení a ochlazení. Fáze předehřevu připravuje DPS a součástky na samotné přetavení. Díky předehřevu se sníží tepelný šok, to znamená menší rozdíl teplot mezi DPS osazenou součástkami a teplotou přetavení. Při předehřevu se odpařují některé kapalné části pasty, mění se viskozita pasty a eliminuje se přístup vlhkosti z okolí. Rychlost teplotní rampy (náběh teploty) by se během předehřevu měla pohybovat mezi 1–3 °C·s<sup>-1</sup>, přičemž by změna teploty měla být rovnoměrně rozložena po celé ploše DPS. Pokud nedojde ke správnému předehřátí pájecí pasty, může dojít k poškození součástek, anebo se při následujícím procesu přetavení můžou rychle uvolnit plynné složky pasty, které dokážou způsobit posun pájené součástky [4, 6].

Při dalším zvyšování teploty se aktivuje tavidlo, které zabraňuje oxidaci pájené plochy a čistí její povrch a povrch práškových částic pájky. Tato fáze se nazývá fází smáčení. V této fázi též dochází k vyrovnání tepelného gradientu napříč celou DPS. Díky tomu jsou nastaveny téměř stejné podmínky přetavení u všech komponentů tak, aby se vytvořila konzistentní vazba pájkou. U velkých desek nebo desek s velkým rozsahem velikostí součástí je obvykle potřebná delší doba smáčení [4, 6].

Jakmile pájecí pasta dosáhne teploty tání, vstoupí DPS osazená součástkami do fáze přetavení. Přetavení je dáno teplotním profilem, který znázorňuje průběh teploty přetavení v závislosti na čase, přičemž důležitými faktory jsou špičková teplota a doba nad teplotou likvidu. Pro vytvoření dobrého pájeného spoje a správné intermetalické sloučeniny na rozhraní je třeba udržet špičkovou teplotu obvykle o 20–30 °C vyšší než je teplota likvidu slitiny a čas přetavení 30-90 s. Typický teplotní profil při pájení přetavením je znázorněn na *Obr. 1* [6].



*Obr. 1 – Teplotní profil přetavení*

Poslední fáze, fáze chlazení, ovlivňuje strukturu zrn pájeného spoje. Díky vysoké rychlosti chlazení mají částice spoje jemnější strukturu a spoj je poté spolehlivější. Avšak příliš vysoká rychlost chlazení může vytvářet tepelné napětí v pájeném spoji, které může způsobit praskliny nebo trhliny. Z tohoto důvodu by rychlost chlazení neměla překračovat hodnotu 3–4 °C·s<sup>-1</sup> [6].

### 1.1.1 Metody pájení přetavením

Proces přetavení pájky lze zprostředkovat různými způsoby jejího řízeného zkapalnění pomocí ohřevu, a to například:

- konvekcí (=prouděním) tepla,
- kondukcí (=vedením) tepla,
- kondenzací par,

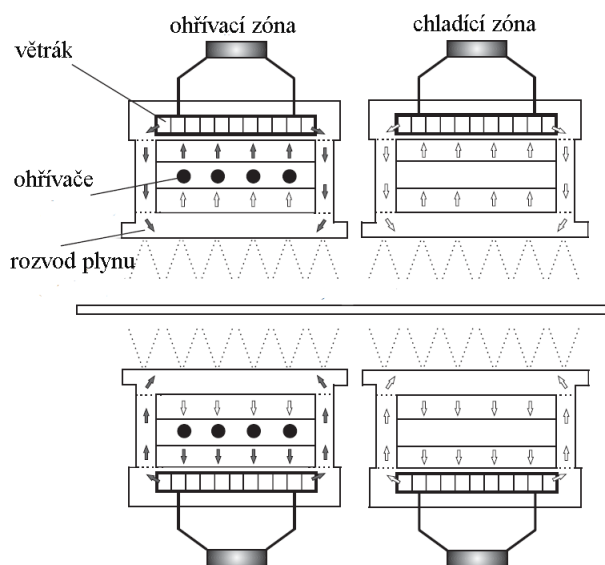
- laserem,
- infračervenými zářiči [5, 7].

### 1.1.1.1 Ohřev konvekcí

Konvekce tepla v konvenčních pecích je realizována difúzí částic v pájené pastě neboli Brownovým pohybem částic, a advekcí (= nucenou konvekcí). Pro správnou funkci takovéto pece je důležité udržet v pracovních zónách pece požadovanou, rovnoměrně rozloženou teplotu a součinitel přestupu tepla. Dalšími důležitými sledovanými parametry jsou parametry pracovního plynu, a to jeho rychlost proudění, tlak a hustota [8].

Nejpoužívanějším typem konvekční pece je dopravníkový typ pece. Jedná se o systém, ve kterém je konvekce rozdělena do jednotlivých teplotně řízených zón (*princip viz kapitola 1.1*), do kterých se pájené desky postupně dostávají posunem pleteného drátového pásového dopravníku. Mezi komorou pece a její vnější stěnou je izolace ve formě nerezového plechu pokrytého skelnou vatou, což zajišťuje stabilitu tepelného toku a minimalizaci tepelného vyzařování z pece. Jednotlivé teplotní zóny od sebe odděleny nejsou. Charakteristickým znakem pro pájení tohoto typu je také to, že výsledný tepelný profil obvykle nenabývá nastavených teplot v jednotlivých zónách [8, 9].

Zóny lze obecně rozdělit na topné a chladicí. Topné zóny se skládají z ohřivačů, jenž provádí ohřev přiváděného topného plynu, kterým je buď dusík nebo vzduch. Pohyb tohoto plynu po povrchu pájeného systému je zajištěn ventilátory. Rychlost proudění plynu a jeho teplota jsou v jednotlivých zónách řízeny odděleně, což zajistí rovnoměrné prohřátí a zabránění zbytečnému pnutí DPS. Princip chladicí zóny je obdobný s rozdílem absence topných těles. Na *Obr. 2* je znázorněné blokové schéma ohřivací a chladicí zóny [8, 10].



Obr. 2 – Blokové schéma ohřivací a chladicí zóny [8]



Nevýhody tohoto typu ohřevu jsou horší přizpůsobivost pro specifitější požadavky pájení a vyšší provozní náklady kvůli nutnosti velkého objemu průtoku plynu pro zajištění účinného ohřevu. Navíc v případě nečistých a ve vodě rozpustných pájecích past s nízkým obsahem reziduí se mohou u konvekčního pájení objevit problémy se smáčením častěji, než je to například u přetavení pomocí infračervených zářičů. I přesto patří konvekční dopravníkové pece stále mezi nejpoužívanější pájecí zařízení, a to díky přesnému řízení teploty, nižším investičním nákladům a vysoké produkční schopnosti [8, 9].

### **1.1.1.2 Ohřev kondukcí**

Ohřev kondukcí je zprostředkován skrze přímý kontakt mezi ohřívacím tělesem a pájenými částmi. Na tomto principu jsou založené například pájecí pece, které mají dopravníkový pás vyrobený ze skelných vláken impregnovaných teflonem s přidaným uhlíkem, což zajišťuje jeho vodivost. Tento typ ohřevu se většinou kombinuje společně s ohřevem infračervenými zářiči nebo konvekčním ohřevem jakožto nástroj pro zrovnomnění zahřívání pájeného systému [9, 11].

### **1.1.1.3 Ohřev kondenzací par**

Pájení v parách je způsob pájení, který je založen na zahřívání pájeného spoje pomocí kondenzace odporově zahřátého galdenu<sup>1</sup> v plynném stavu. Historicky se jako pracovní plyn používal chlorfluoruhlodík, avšak nyní jsou z důvodu ochrany životního prostředí přijatelné pouze galdeny na bázi hydrofluoruhlodíku [5, 12].

Tento způsob ohřevu má celkem frekventované využití, a to díky přesnosti nastavení teploty a rovnoměrnému zahřívání pájených součástek s odlišnou topologií, což zajišťuje skvělou kvalitu pájených spojů. Navíc díky inertní atmosféře, ve které pájení probíhá, lze použít tavidla s nižší úrovní aktivace. Nevýhodou pájení v parách je častá tvorba bublin a prasklin v plastových pouzdrech součástek při příliš rychlém předeřevu [12].

### **1.1.1.4 Ohřev laserem**

Laserové přetavení se díky fokusovanému dodávání tepla využívá především pro připojení teplotně citlivých součástek a součástek, které jsou hustě osazeny na DPS. Běžně používané typy laseru jsou Nd:YAG, kde je aktivním materiálem izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu ( $Y_3Al_5O_{12}$ ) dopovaný ionty neodymu ( $Nd^{3+}$ ), a  $CO_2$  laser. Laserové pájení nevyžaduje žádné teplotní zóny k profilování a nezpůsobuje deformaci substrátu. Avšak při příliš vysoké energii použitého laseru nebo příliš krátké době pájení, může být spoj ohříván

---

<sup>1</sup> dielektrická pracovní kapalina s bodem varu od 55 do 270 °C [5]

nehomogenně, což může způsobit defekty jakožto kuličkování pájky a zuhelnatění spoje [9, 12, 13].

### 1.1.1.5 Ohřev infračervenými zářiči

Ohřev pomocí infračervených zářičů funguje na základě dobré absorpce infračerveného záření pájenými součástkami a DPS. Absorpce a odraz infračerveného záření jsou ovlivněny barvou, drsností a tvarem povrchu pájených komponent. Odlišné součástky mohou vytvářet různé profily ohřevu, což při požadovaném homogenním pájení DPS není zcela žádoucí. Při pájení větších zařízení, jako například PLCC, může navíc docházet k zastínění menších pouzder a jejich špatnému zapájení. Mezi další nežádoucí jevy, které se objevují u tohoto typu pájení, patří rychlé přehřátí desky, delaminace a efekt náhrobního kamene (*viz kapitola 2.2*) [5, 7, 11].

## 1.2 Pájka

Pájka, hlavní prostředek na vytvoření trvalého vodivého pájeného spoje, je tavitelná kovová slitina s nižším bodem tání, než mají spojované materiály. Pájka může být v pevné nebo pastovité formě [3]. Tato práce je zaměřena na pájky ve formě pájecí pasty, z toho důvodu se další kapitoly budou zaměřovat pouze na jejich popis.

Každá pájecí pasta musí splňovat hned několik kritérií:

- dobré tečení pro umožnění jejího nanesení na požadované místo,
- stálost a určitou nehybnost na místě po jejím nanesení,
- adhezi pro udržení osazených součástek před samotným zapájením,
- spojení a homogenitu její částic po zahřátí,
- dostatečný tavící účinek pro správné smáčení [14].

Tato uvedená kombinace vlastností záleží především na složení pájecí slitiny, která se v pastě vyskytuje ve formě prášku tvořeného z kuliček o velikosti desítek  $\mu\text{m}$ , popřípadě elipsoidů slitiny. Tyto kuličky slitiny tvoří většinou přibližně 50 % objemu a 90 % hmotnosti slitinypasty. Prášková pájka určuje kvalitu tisku, roztékání, viskozitu a podílí se i na smáčecích charakteristikách a předurčuje teplotu tavení. [2, 14].

Kvalitu pájecí pasty ovlivňuje především její celkové složení. Její další komponenty jsou tavidlo v gelové formě a reologické modifikátory zajišťující lepivost, viskozitu a roztékavost [14, 15].

## 1.2.1 Intermetalická vrstva

Pájený spoj se skládá ze tří hlavních částí, a to samotné pájky, (nejčastěji) měděného substrátu a vrstvy intermetalické sloučeniny (IMC) mezi nimi. IMC vrstva je tvořena sloučeninou z různých podílů dvou nebo více elementárních kovů, přičemž vlastnosti IMC se většinou výrazně liší od vlastností jednotlivých složek. IMC vrstva vzniká během procesu pájení a tuhnutí a její existence je ukazatelem správného pájení. Při její absenci nedojde ke spolehlivému spojení pájené součástky a substrátu, avšak její nadměrný růst se může negativně projevit na spolehlivosti pájeného spoje. IMC může přispívat ke zvýšení křehkosti spoje, a to především při vystavení spoje tepelnému stárnutí. Z tohoto důvodu je důležité mít růst intermetalické vrstvy za různým podmíněk podchycen [16–18].

## 1.2.2 Tavidlo

Pojmem tavidlo se dá označit široká škála materiálů, které mají schopnost redukce povrchových oxidů. Mezi ně patří řídká kapalná tavidla s vysokým obsahem rozpouštědel a vysoce viskózní materiály používané při výrobě past, ale také pevné tavicí báze, jako je kalafuna. V této práci je pojmem tavidlo označován tavidlový nosič rozpuštěný ve směsi rozpouštědel a aktivátorů smíchanými se zahušťovadly a mazadly [2, 14].

Hlavním úkolem tavidla je:

- udržovat pájecí prášek rovnoměrně rozptýlený v pastě a zabránit vysrážení částic,
- udržovat konzistenci pasty během nanášení,
- čistit povrch práškové slitiny a spojovaných součástí a chránit je před opětovnou oxidací během pájecího cyklu [14].

Při určování viskozity pájecí pasty hraje tavidlo společně s rozpouštědlem a aditivou hlavní roli. Tavidlo navíc dodává pastě správné tokové vlastnosti a urychluje proces smáčení pájky. Tím napomáhá tvorbě kvalitního a spolehlivého pájeného spoje [14].

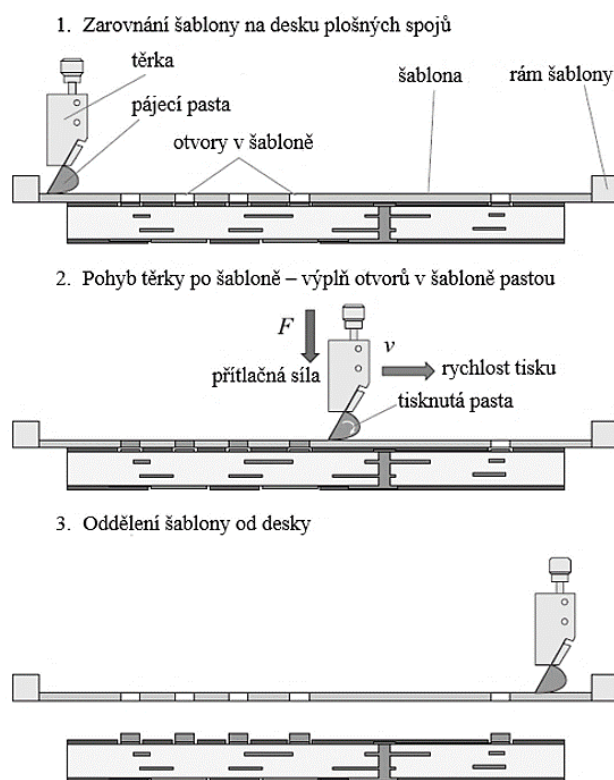
Tavidla rozdělujeme dle jejich složení na pryskyřicová, organická a anorganická. Pryskyřicová tavidla mohou být buď založená na kalafuně – přírodní pryskyřice (RO), nebo mohou být bez kalafuny – syntetická pryskyřice (RE). Organická tavidla (OR), označována též meziproductová, jsou založená na organických sloučeninách, obzvláště na kyselinách jako je např. citronová. Základem posledního typu tavidel – anorganických (IR), nesoucích též název korozivní, jsou anorganické kyseliny nebo soli. Každé z uvedených tavidel může mít různou úroveň aktivace [2, 19].

### 1.2.3 Depozice pájky

Proces nanášení pájky na požadované pájené místo je jednou z kritických částí technologie pájení, při níž nastává až 60–70 % z celkových defektů pájení. Při nanášení pájky je nutné dát si pozor na aplikaci optimálního množství pájky a nanesení pájky na správné místo připojení. Máme-li pájku v pastovité formě, můžeme její nanášení provést dispenzí (dávkováním), sítotiskem či šablonovým tiskem [3, 8].

Nanášení dávkováním spočívá v umístění pájky na určené místo dávkovačem, který může být ruční či strojní. Tento způsob nanášení není z hlediska rychlosti efektivní, a z toho důvodu se tolik nevyužívá v hromadné výrobě. Může se však uplatnit ve výrobě s kusovou či vzorkovou variabilitou [3].

Tisk pájecí pasty pomocí šablony a síta fungují na stejném principu. Je to rychlý proces, při kterém se pájecí pasta vtlačí do otvorů v umístěné šabloně/sítu na DPS pomocí těrky s předdefinovaným tlakem a rychlostí. Šablonový tisk se vyvinul z procesu sítotisku. V porovnání se sítotiskem umožňuje použití šablony přesnější kontrolu objemu pájecí pasty. Šablona je obvykle vyrobena z nerezové oceli nebo niklu. Její tloušťka se pohybuje okolo 50–200  $\mu\text{m}$ . Jednotlivé kroky při tisku šablonou popisuje Obr. 3 [8, 9].



Obr. 3 – Popis postupu při šablonovém tisku [8]

## 1.2.4 Bezolovnaté pájecí slitiny

Bezolovnaté pájecí slitiny jsou hojně rozvíjeny od roku 2006, kdy byly v Evropské unii a USA zakázány kvůli negativnímu dopadu na životní prostředí a na lidský organismus elektronické produkty obsahující toxické olovo (směrnice RoHS — *Restriction of Certain Hazardous Substances* a WEEE — *Waste Electrical and Electronic Equipment Legislations*). Cílem tohoto vývoje je nalézt ideální náhrady za tradiční olovněné slitiny, jako je kupříkladu i eutektická cín-olovněná pájka Sn60Pb40 (teplota tání 183 °C), které by měly podobné fyzikálně-chemické vlastnosti a byly ekonomicky přijatelné [20].

Bezolovnaté pájecí slitiny můžeme klasifikovat na základě jejich teploty tání, a to na vysoko-teplotní, středně-teplotní, nízko-teplotní a ultra-nízko-teplotní [21].

Teplota tavení vysoko-teplotních pájecích slitin se pohybuje v rozmezí 270–350 °C. Většina vysoko-teplotních pájek obsahuje zlato kvůli dosažení požadovaného tání/tuhnutí a pevnosti. Náklady na tyto pájky jsou sice vyšší, je zde však vysoký potenciál na jejich zpětnou recyklaci. Další zástupci těchto pájek mohou být i na bázi bismutu nebo slitiny zinek-hliník. Mezi jejich představitele řadíme například slitiny [21, 22]:

- Au96,8Si3.2 ( $t_T = 363$  °C),
- Au88Ge12 ( $t_T = 356$  °C),
- Au80Sn20 ( $t_T = 280$  °C),
- Au78Sn22 ( $t_T = 280$ – $300$  °C) [21].

Pájky, které mají středně-teplotní profil, jsou především tvořeny cínem. Cín společně se stříbrem a mědí tvoří vysoce spolehlivou, a tudíž hojně komerčně využívanou skupinu pájecích slitin nazývaných též zkráceně SAC. Přidáním dalších prvků, jako jsou bismut, indium, mangan a zinek dochází k úpravě vlastností slitin a snížení jejich teplot tání. Zástupci těchto pájek jsou například [21, 23]:

- Sn65Ag25Sb10 ( $t_T = 233$  °C),
- Sn99,3Ni0,7 ( $t_T = 227$  °C),
- Sn96,5Ag3Cu0,5 ( $t_T = 217$ – $221$  °C),
- Sn90Ag3,8Bi1,5Cu1,2Sb3,5 ( $t_T = 216$ – $226$  °C),
- Sn86,58Bi3,5In4,5Zn5,5 ( $t_T = 174$ – $186$  °C) [21].

V současné době jsou díky ekonomickým, ekologickým a výrobním benefitům při výrobě spotřební elektroniky rozšířeny pájky nízko-teplotní, které jsou typicky v binárním systému typu cín-bismut či cín-indium. Slitiny se též dopují, a to například bismutem, anebo stříbrem,

které mění mechanické i termické vlastnosti. Aditivum stříbra zajistí pájce vyšší tvrdost, snížení teploty tání a zlepšení smáčení. Přidání bismutu do slitiny má rovněž za následek snížení teploty tání, a navíc její zpevnění v tahu. Do této skupiny pájecích past patří například [21, 24, 25]:

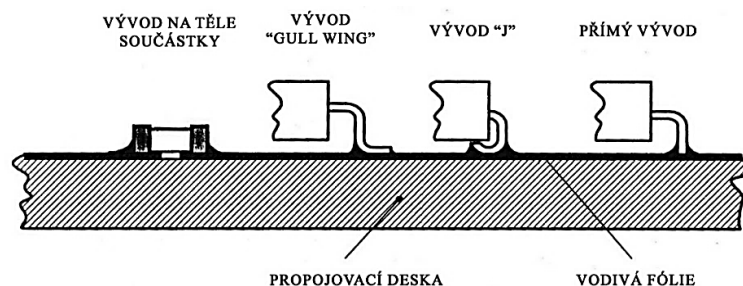
- In99,5Ga0,7 ( $t_T = 150\text{ °C}$ ),
- In97Ag3 ( $t_T = 143,3\text{ °C}$ ),
- Bi57Sn42Ag1 ( $t_T = 139\text{--}140\text{ °C}$ ),
- Bi58Sn42 ( $t_T = 138,3\text{ °C}$ ),
- Sn52In48 ( $t_T = 118\text{--}131\text{ °C}$ ) [21].

Poslední uvedenou skupinou jsou pájky s ultra-nízkou teplotou tání. Kvůli svým termickým vlastnostem mají využití jen ve velmi specifickém průmyslovém okruhu a v běžných aplikacích se s nimi nesečkáme. Tyto slitiny se skládají především z bismutu nebo india a řadíme sem například slitiny [21]:

- Bi67In33 ( $t_T = 109\text{ °C}$ ),
- In52,2Sn46Zn1,8 ( $t_T = 108\text{ °C}$ ),
- Bi54In29,7Sn16,3 ( $t_T = 81\text{ °C}$ ),
- Bi57In26Sn17 ( $t_T = 79\text{ °C}$ ),
- In51Bi32,5Sn16,5 ( $t_T = 60\text{ °C}$ ) [21].

### 1.3 Pouzdra SMD součástek

Technologie povrchové montáže součástek SMT (*Surface Mount Technology*) se vyznačuje tím, že jsou součástky připojeny na DPS přímo ze strany propojovací fólie. Tzn. součástky jsou pájeny na stejné straně, na které jsou usazeny, na rozdíl od technologie THT (*Through-hole Technology*), u které je vývod součástky jdoucí skrze DPS zapájen na opačné straně, než je osazena součástka. Pouzdra SMD součástek mají většinou páskové vývody a to typu „rací křídlo“ neboli „GW“ (*Gull Wing*), typu „J“, anebo přímého typu. Vývody pasivních i aktivních součástek mohou být též umístěné bezprostředně na pouzdru v podobě pokovených terminálů na bocích nebo na spodní straně obalu. Zmíněné typy vývodů zobrazuje Obr. 4 [3].



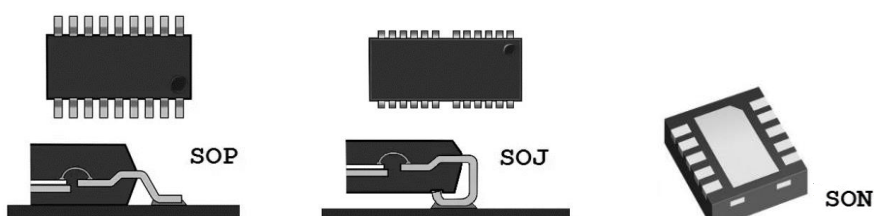
Obr. 4 – Typy vývodů SMD pouzder [3]

Součástky můžeme obecně rozdělit na aktivní a pasivní. Mezi nejpoužívanější SMD součástky pasivního charakteru, tedy součástky spotřebovávající energii zdroje, patří tlustovrstvé rezistory a keramické vrstvené kondenzátory. Obal těchto součástek je tvořen papírovým či plastovým krytem. Rezistory jsou označeny písmenem R a kondenzátory písmenem C, s číselným kódem charakterizující jejich velikost [8, 26].

Aktivní diskrétní i integrované SMD součástky mohou být klasifikovány různými způsoby. Pouzdra integrovaných obvodů můžeme dělit dle rozmístění vývodů na pouzdra (lineárně, obdélníkově či čtvercově), tvaru vývodů (*viz první odstavec v této kapitole*) a počtu, popřípadě rozměru vývodů. Dělení součástek obecně závisí na konkrétních dodavatelích a prodejích. Obecně můžeme součástky zjednodušeně rozdělit na hlavní typy a to SO (*Surface Mount Small Outline Packages*), FP (*Flat Pack*), CC (*Chip Carrier*), GA (*Grid Array*) a CS (*Chip Scale/Non-packaged*) [27].

### 1.3.1 Pouzdra typu SO

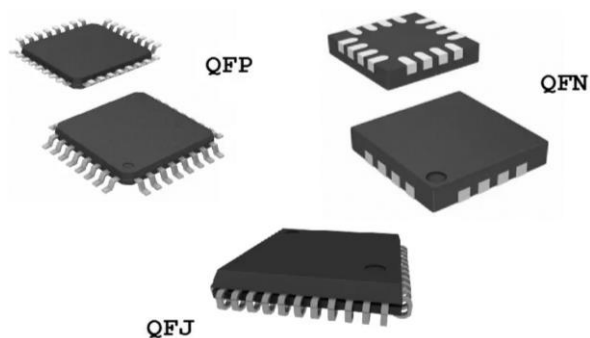
První zmíněná skupina je v oblasti povrchové montáže součástek velmi rozšířena. Použitý materiál pro výrobu pouzdra je buď plast nebo keramika. Pouzdra součástek mají dvě řady vývodů, které mohou být typu J – např. součástka SOJ (*Small Outline J-leaded package*), typu GW – např. součástka SOP (*Small Outline Package*) a „bezvývodového“ typu, která má vodivé terminály přímo na pouzdru – např. SON (*Small Outline Non-leaded package*). Zástupci této skupiny součástek jsou zobrazeny na Obr. 5 [3, 27].



Obr. 5 – Příklad pouzder typu SO [27, 28]

### 1.3.2 Pouzdra typu FP

Pouzdra součástek typu FP se vyznačují tím, že jsou malá, lehká a levná. Mají obdélníkový či čtvercový tvar, jsou většinou z plastu a jejich vývody jsou ve dvou nebo čtyřech řadách podél okrajů součástky. Stejně jako u předchozí skupiny mohou mít vývody tvar GW, J nebo mohou být přímo na těle pouzdra. Příklady těchto pouzder jsou QFP (*Quad Flat Package*) s vývody J, QFJ (*Quad Flat J-leaded package*) s vývody GW a QFN (*Quad Flat Non-leaded package*) s vývody přímo na pouzdru. Příklady těchto pouzder jsou uvedeny na Obr. 6 [3, 27].



Obr. 6 – Příklad pouzder typu FP [27]

### 1.3.3 Pouzdra typu CC

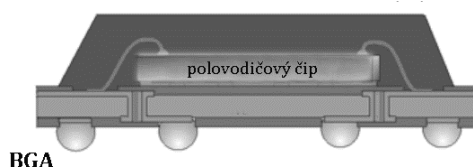
U této skupiny jsou pouzdra čtvercového tvaru s vývody na všech čtyřech stranách. Pouzdra tvořená z plastu mají vývody typu J, anebo přímé vývody – příkladem je PLCC (*Plastic leaded chip carrier*). Pouzdra nemusí mít drátové vývody, ale místo nich mohou mít jen připojovací plošky. Takováto pouzdra jsou vyráběna z různých typů keramik, jako je  $Al_2O_3$ . Mezi „bezvývodová“ pouzdra patří např. CLCC (*Ceramic lead-less chip carrier*). Zástupci této skupiny pouzder jsou zachyceny na Obr. 7 [3, 27].



Obr. 7 – Příklad pouzder typu CC [27]

### 1.3.4 Pouzdra typu GA

Předposlední uvedenou skupinou je skupina GA. Již z názvu vyplývá, že hlavním rysem těchto pouzder, jež mohou být v keramickém či plastovém provedení, je typ a realizace vývodů. Vývody, které jsou umístěny v mřížce po celé spodní části pouzdra, mají charakteristický kuličkový tvar. Můžeme se však setkat i s „bezvývodovými“ variantami. Dalšími rysy těchto pouzder jsou kompaktní velikost, vysoký počet vývodů a nízká indukčnost. Do této skupiny pouzder patří například typ LGA (*Land Grid Array*) a BGA (*Ball Grid Array*), který je znázorněn na Obr. 8 [27, 29].



Obr. 8 – Příklad pouzder typu GA [29]



### 1.3.5 Pouzdra typu CS

Pro pouzdra typu CS je typické, že mají téměř stejnou velikost jako samotný krytý čip. Díky tomuto je tento typ pouzder často využíván v počítačových a telekomunikačních aplikacích. Tato pouzdra mohou být na pevných i flexibilních substrátech a nejčastěji mají kuličkové vývody jako typ BGA. Příkladem je CSP (*Chip-scale package*) – viz *Obr. 9* [3, 27, 29].



CSP

*Obr. 9 – Příklad pouzder typu CC [29]*

## 1.4 Desky plošných spojů

Deska plošného spoje je nástroj na montáž, upevnění, mechanickou podporu a elektrické propojení součástek. Typická deska plošného spoje se skládá z jádra, které je tvořeno nosným elektroizolačním materiálem z obou stran nalaminovaným tenkými (mikrometrovými) měděnými fóliemi. Následně se pomocí fotolitografie či frézování vytvaruje na desce požadovaný vodivý vzor, u vícevrstevných či oboustranných DPS se vytvoří tzv. prokovy<sup>2</sup>, deska se pokoví mědí, nanese se ochranná izolační maska, provede se povrchová úprava, a nakonec se sítiskem označí požadované komponenty [30, 31].

Tato práce se zaměřuje na vliv různého nosného substrátu a povrchové úpravy. Z toho důvodu jsou následující kapitoly věnovány právě těmto dvěma tématům.

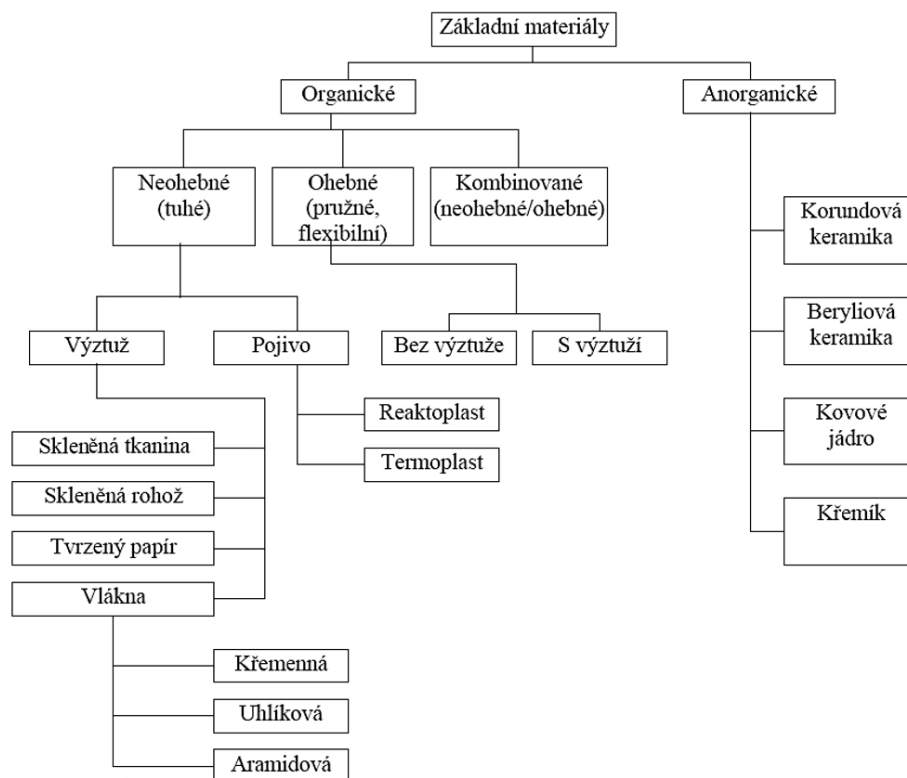
### 1.4.1 Nosný substrát

Výchozím nosným substrátem desky jsou nevodivé podložky. Nosné substráty mohou být organického nebo anorganického charakteru či jejich kombinací. Elektrické vlastnosti výsledného obvodu zcela závisí na dielektrických vlastnostech základního materiálu, a proto je výběr substrátu velmi důležitý. Dělení základního materiálu DPS viz *Obr. 10* [2, 31].

Izolační substrát může být pro zlepšení odvodu tepla z desky, zvýšení pevnosti, snížení hmotnosti a velikosti desky nanesen na kovovou základnu s tloušťkou přibližně 1 mm [32]. Kovová základna je přitom většinou ve formě hliníku. Tento typ substrátu je též zkoumán v rámci experimentu této práce.

---

<sup>2</sup> elektrické spojení mezi měděnými vrstvami vícevrstvé DPS [30]



Obr. 10 – Dělení základního materiálu DPS [2]

## 1.4.1.1 Organické pevné substráty

### 1.4.1.1.1 Fenolformaldehydové lamináty

Tyto lamináty mají pojivo ve formě fenolové pryskyřice složené z roztoku fenolu a formaldehydu v rozpouštědle. Pryskyřice zajišťující tvrdost materiálu jsou vyztuženy celulóзовými plnivými. Fenolické lamináty mají díky nízkým nákladům na jejich výrobu rozsáhlé komerční využití, a to především pro jednovrstvé a dvouvrstvé DPS. Dále se vyznačují jednoduchou fabrikací a děrovatelností. Jejich nevýhodou je například špatná odolnost vůči elektrickému oblouku a vysoká navlhavost. Do této skupiny patří např. typ laminátu XPC, FR1, a FR2 [2, 31].

### 1.4.1.1.2 Epoxidové lamináty

Epoxidové lamináty v současné době nejrozšířenějším typem nosného substrátu. Jsou tvořeny epoxidovou pryskyřicí, která může být vyztužena různým typem materiálu, jako je tvrzený papír – zástupce FR3, skelná tkanina – zástupci FR4, FR5, nebo jejich kompozit – zástupce CEM1. Při laminaci dochází k vytvrzení epoxidové pryskyřice, čímž se z ní stane chemicky, termicky a mechanicky odolná struktura se skvělými elektrickými vlastnostmi v širokém rozsahu teplot a frekvencí. Přidáním aditiv lze u epoxidových laminátů dosáhnout zvýšení teploty skelného přechodu a snížení teplotního součinitele roztažnosti [2, 31].

#### **1.4.1.1.3 Polyesterové lamináty**

Základem je nenasyčená polyesterová pryskyřice vyplněná skelným vláknem a/nebo skelnou rohoží. Výhodnou těchto laminátů je nízká pořizovací cena, odolnost proti vlhkosti a dobré mechanické a elektrické vlastnosti. Značnou nevýhodou může být eventuální deformace a zkroucení po procesu pájení. Do této skupiny patří například GPO kompozity a samozhášivá FR6 [2, 15, 31].

#### **1.4.1.1.4 Polyamidové lamináty**

Ve vojenských a leteckých aplikacích nacházejí díky vyšší pevnosti měděných spojů a teplotní odolnosti využití polyamidové lamináty, u kterých tvoří výztuž skelná tkanina nebo aramidové vlákno/tkanina. Dále se tyto lamináty vyznačují malou roztažností v ose z a skvělými mechanickými a elektrickými vlastnostmi, kterých je dosaženo na úkor vyšší pořizovací ceny. I zde však můžeme narazit na nedostatky, jako je náchylnost na odlupování materiálu při vysokých teplotách, což se může projevit jako nadzvedávání měděných vodičů [2, 31].

#### **1.4.1.1.5 Polytetrafluoretylenové lamináty (PTFE)**

PTFE laminát je termoplast vyztužený skelnou tkaninou či vláknem, který dosahuje nízké navlhavosti, odolnosti vůči vysokým teplotám, vysoké elektrické pevnosti a vysokého izolačního odporu. Využívá se především ve vysokofrekvenčních aplikacích, jako jsou vysokoimpedanční měřicí přístroje a zesilovače [2, 31].

#### **1.4.1.2 Organické flexibilní substráty**

Flexibilní materiály tvoří s rozvojem elektrotechnologických aplikací nenahraditelnou součást trhu, a to díky své menší hmotnosti, prostorové úspornosti a nižší pořizovací ceně. Stejně jako neohebné substráty plní flexibilní substráty základní požadavky na nosný substrát, jako je správná izolace vodivých cest, kompatibilita s vodivými lepidly, pevnost v ohybu, tepelná odolnost, nízké navlhání a dobré elektrické vlastnosti [33].

##### **1.4.1.2.1 Polyimidové lamináty (PI)**

Polyimidové lamináty jsou díky svým mnoha příznivým vlastnostem nejrozšířenějším flexibilním materiálem. Jsou to totiž nehořlavé termosetové polymery, které nevykazují měknutí ani tání, jsou vysoce ohebné a mají dobré elektrické a chemické vlastnosti v širokém rozsahu teplot – od kryogenních teplot po teploty pájení do cca 400 °C. Kvůli vyšší ceně se využívají především pro aplikace vyžadující vysokou spolehlivost a odolnost vůči vlivu prostředí. Nepříznivým atributem je u PI laminátů sklon k navlhání. Tomu se předchází důkladným

vysušením laminátu před zpracováním a jeho následným monitorováním během výroby. Šířka PI fólie se pohybuje v řádech 7,5—125 mikrometrů [2, 33].

#### **1.4.1.2.2 Polyetyléntereftalátové lamináty (PET)**

Materiály typu PET se vyznačují tloušťkou v řádech 25–125 mikrometrů a nižší tepelnou odolností, nežli je u PI. Tuto nevýhodu lze však obejít šetrnějšími postupy pájení nebo použitím vodivých lepidel. Pro PET lamináty je také příznačná dobrá pružnost, skvělé elektrické vlastnosti, vysoká chemická odolnost, rezistivita vůči vlhkosti, snadná děrovatelnost a opracovatelnost. Jejich další předností jsou nižší náklady na stavební suroviny a technologii výroby, kterou je *roll-to-roll*<sup>3</sup> technologie. Z tohoto důvodu zaujímají velký podíl ve velkoobjemových aplikacích jako je například výroba kalkulaček, videorekordérů a tlačítkových displejů [2, 33].

#### **1.4.1.2.3 Polyetylénnafthalátové lamináty (PEN)**

Tyto substráty jsou dalším vývojovým krokem v oblasti flexibilních substrátů. Mají vyšší provozní teploty, a i v dalších parametrech dosahují příznivějších výsledků než PET fólie. Navíc lze snadno přizpůsobovat požadavkům zákazníků co se týče například barvy a tvaru [2, 29].

#### **1.4.1.3 Anorganické substráty**

Na rozdíl od organických materiálů se anorganické substráty vyznačují vysokou tepelnou vodivostí. Mimo to jsou velmi chemicky odolné, mechanicky nepropustné a vlivem tepla u nich nedochází k výrazné roztažnosti substrátu. Mezi jejich negativní rysy však patří vyšší hmotnost, křehkost, cena, rozměrové omezení a u některých typů je negativem i toxicita (BeO keramiky). Mezi nejčastější zástupce této skupiny patří korundové a beryliové keramiky [2].

### **1.4.2 Povrchová úprava DPS**

Povrchová úprava desek plošných spojů je nezbytnou součástí jejich výroby, neboť povrch měděných plošek je velmi citlivý na nečistoty, které se negativně podepisují na oxidaci a korozi mědi. Důsledkem toho je zvýšení hodnot mezipovrchového napětí, což má poté za následek například zhoršení smáčivosti. Volba povrchové úpravy záleží na tom, jak je cenově a materiálně dostupná, jak vyhovuje požadavkům a zda dokáže splnit požadované specifikace. Mezi základní druhy povrchových úprav DPS patří [34, 35]:

- HAL (*Lead-free Hot Air Leveling*),
- OSP (*High temperature Organic Solderability Preservative*),
- I-Sn (*Immersion tin*),

---

<sup>3</sup> výroba převíjením substrátu, kdy jsou veškeré komponenty postupně převíjeny na základní materiál [33]

- I-Ag (*Immersion silver*),
- I-Pd (*Immersion palladium*),
- ENIG (*Electroless Nickel/Immersion Gold*),
- ENEPIG (*Electroless Nickel/Electroless Palladium/immersion Gold*),
- ENAG (*Electroless Nickel/Autocatalytic Gold*),
- EPAG (*Electroless Palladium Autocatalytic Gold*) [34].

Před zavedením směrnic RoHS a WEEE byl dominantním typem povrchové úpravy tvořícím 70 % celosvětového trhu olovnatý HAL. Tato úprava však ustoupila a byla nahrazena její bezolovnatou formou. V současné době jsou na trhu nejrozšířenějšími povrchovými úpravami ENIG (40 % trhu), OSP (21 % trhu) a I-Sn (20 % trhu) [34, 35]. V následujících kapitolách jsou představeny tyto nejrozšířenější povrchové úpravy spolu s dalšími vybranými povrchovými úpravami rozšířenými v České republice.

#### 1.4.2.1 ENIG

Povrchová úprava ENIG neboli technologie pokovení imerzním zlatem je v celosvětovém měřítku nejvíce používanou povrchovou úpravou v průmyslu hromadné výroby DPS. Tenká vrstva zlata o tloušťce minimálně 0,05  $\mu\text{m}$  je v Au-lázni nanášená na předem autokatalyticky zhotovenou vrstvu niklu, která má tloušťku 3–6  $\mu\text{m}$ . Meziproces nanášení bariérové vrstvy niklu je nezbytný. Kdyby bylo zlato aplikováno na měděný povrch přímo, došlo by k rychlému difundování mědi skrze zlato a tato ochrana by byla neúčinná. ENIG disponuje řadou žádoucích atributů, jako je dosažení skvělé rovinnosti, odolnost vůči vícero přetavovacím cyklům a vhodnost pro alternativní typy připojení (např. *wire bond*<sup>4</sup>). Nanášené zlato se navíc snadno dokáže rozpustit v pájce a nezanechává v ní skvrny. Všechny tyto aspekty jsou samozřejmě podmíněny vysokou cenou úpravy. Pokud navíc není proces pokovení správně řízen, může dojít při ponoru DPS do Au-lázně k rozpouštění vrstvy niklu, a to má za následek špatnou pevnost konečného spoje [34–36].

#### 1.4.2.2 HAL

Princip této metody spočívá v aplikaci cínové pájky pomocí ponoření upravované DPS do roztavené pájky. Následně je deska z lázně vyjmuta a povrch je očištěn horkým vzduchem. Jak již bylo zmíněno, olovnatou variantu této metody, kdy byla deska ponořena do lázně PbSn, nahradila varianta bezolovnatá s využitím pájek SnCuNi, SnAgCuNi nebo SnCuCo, případně prakticky čistý cín. Bezolovnatý povlak HAL vyniká dobrým rovinným povrchem, dlouhodobou

---

<sup>4</sup> připojení součástky k DPS skrze jemné drátky

skladovatelností, skvělou pájitelností a odolností vůči korozi. Nevýhodou může být u méně odolných substrátů vznik deformace desky vlivem teplotního šoku [35, 37].

### 1.4.2.3 OSP

U OSP povrchové úpravy jsou na měděné plošky DPS chemicky nanášeny organické inhibitory oxidace mědi. Pozitivum této úpravy je jednoduchost procesu, s čímž se pojí i nižší výrobní cena. OSP se běžně používá v jemné montáži pro jednostranné desky, například ve výrobě mobilních zařízení. Nedostatkem OSP úpravy je nízká pájitelnost a horší skladovatelnost při mnohočetném teplotním cyklu [34, 35, 37].

### 1.4.2.4 I-Sn

Povrchová úprava pomocí imerzního cínu vznikla jako levnější a ekologičtější náhrada za olovnatý HAL. Je to univerzální metoda, pomocí které lze upravovat oboustranné DPS s integrovanými obvody. Touto metodou se též dosahuje dobrého rovinného povrchu desky. Nevýhodou je poměrně složitý proces úpravy, u kterého se použité lázeň skládá z halogenidu cínatého a thiomocoviny. Dalším problémem pro tuto úpravu je zvýšená teplota, kdy se může tenká vrstva cínu téměř úplně přeměnit na intermetalický SnCu a tím se sníží pájitelnost plošek. Často je i zmiňovaná problematika vzniku *whiskerů*<sup>5</sup>. Avšak nanesená vrstva cínu je dostatečně tenká, a proto je vznik dlouhých *whiskerů* nepravděpodobný [34, 35].

### 1.4.2.5 I-Ag

Princip této povrchové úpravy je podobný jako úprava I-Sn. Její výhodou oproti metodě předchozí je vyšší vodivost stříbra, což je výhodné pro vysokofrekvenční aplikace. Stříbrný povrch však není vhodný do vlhkých a sirnatých prostřední, ve kterých podléhá korozi a tečení. Další nevýhodou je i vyšší cena stříbra [34].

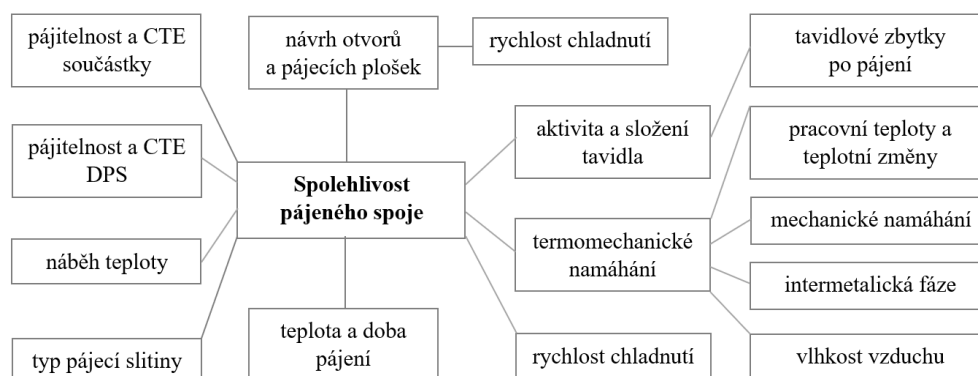
---

<sup>5</sup> vlasovitý cínový výčnělek

## 2 Spolehlivost pájených spojů

Spolehlivost pájeného spoje můžeme definovat jako pravděpodobnost, že daný spoj bude bez poruchy plnit za daných provozních podmínek určenou funkci po požadovanou dobu. Tuto pravděpodobnost lze určit pomocí různých diagnostických testů [38]. Tyto diagnostické nástroje jsou definovány v kapitole 2.1.

Pro správný a kvalitní spoj musí platit, že jeho povrch musí být lesklý, hladký a spojitý. Pokud je povrch pájky matný či drsný, spoj je s největší pravděpodobností i křehký. Vadný spoj nazýváme též „studený“, tzn. není schopen správné elektrické vodivosti. Dalším důležitým aspektem je umístění a optimální množství použité pájky, aby byla zajištěná dobrá vodivost a mechanická pevnost spoje. Pájka musí správně smáčet pájený substrát a na okrajích spoje musí být zřetelný smáčecí úhel menší než 15°. Na Obr. 11 jsou zobrazeny některé vlivy, které mohou ovlivnit spolehlivost pájeného spoje [2, 39, 40].



Obr. 11 – Vlivy na spolehlivost pájeného spoje [2]

### 2.1 Diagnostické spolehlivostní nástroje

Testy zaměřené na diagnostiku spolehlivosti pájených spojů jsou založeny na simulaci zatížení daných spojů, přičemž většina testů je kvůli časové náročnosti zrychlená a se zvýšenou intenzitou vystavení agresivním podmínkám prostředí. Jejich cílem je získat údaj o vlastnostech poruch spoje. Poruchy spojů jsou často hodnoceny z časového hlediska neboli měří se doba do poruchy spoje. Samozřejmě jsou sledovány i další parametry poruch, a to v závislosti na provedené diagnostice. Každý test je následně doplněn řadou nedestruktivních testů, jako jsou testy zjišťování vodivosti spojů a vizuální testy na zjišťování možných vzniklých defektů. Mezi běžné spolehlivostní diagnostické testy patří [38]:

- teplotní cyklické testy,
- teplotní šokové testy,

- testy cyklování napájení,
- testy skladování při vysoké/nízké teplotě,
- zatěžovací napěťové testy,
- proudové testy,
- testy citlivosti na vlhkost,
- testy slanou atmosférou,
- vibrační testy,
- testy mechanického ohybu, tahu, smyku, stříhu a kroucení,
- elektromigrační testy [38].

V následujících kapitolách jsou shrnuty principy testů, které byly aplikovány v experimentální části této práce.

### **2.1.1 Zkoušky teplotním šokem**

Při zkouškách teplotním šokem jsou testované vzorky vystaveny periodickým výkyvům teplot vzduchu. Tím jsou zrychleně simulovány změny teplot během normálního provozu, které vedou k poruchám funkčnosti spojů. Šokové zkoušky jsou většinou kvůli jednoduchosti provedení a údržby typu vzduch-vzduch. Mohou být však i typu kapalina-kapalina, kdy se testovaný vzorek přenáší z jedné kapaliny s extrémní teplotou do druhé s opačným extrémem. Při tomto typu zkoušky je ve srovnání s typem vzduch-vzduch účinnější přenos tepla a jeho absorpce. Poškození spojů způsobená šokem se určují ztrátou pevnosti a následnými nedestruktivními zkouškami, jako je například měření odporu spojů či vizuální zkoušky [41–43].

Běžné zařízení pro tuto formu zkoušek se skládá ze dvou komor, a to horké a studené komory. Testované vzorky jsou mezi těmito komorami přemísťovány pomocí elevátorového mechanismu. Gradient přechodu mezi teplotními extrémy je přitom velmi velký, více než 15 °C za minutu. Teplotní cyklování lze též provádět v zařízení s pouze jednou komorou, ve které se teplota mění od vysoké až po nízkou pod bod mrazu. Nevýhoda tohoto provedení je oproti dvoukomorovému zařízení pomalejší změna teploty [4, 42, 44].

Pro každou zkoušku šokem je důležité definovat krajní hodnoty teplot ve studené a teplé komoře. Čím větší je rozdíl teplot v komorách oproti běžným provozním teplotám, tím se zrychluje degradace vzorku, čímž se dosahuje zrychlení simulace degradace běžného provozu. Avšak přesáhnutím limitních provozních teplot dochází k poruchovým stavům, které by za obvyklých podmínek nenastaly a zkouška se tak může stát neplatnou. Důležitým kritériem je i délka setrvání vzorku při nastavené krajní teplotě. Obecně platí, že větší a hmotnější vzorky musí zůstat na dané teplotě delší dobu než vzorky malé a lehké, a to z toho důvodu,



aby se vzorky stačily vyrovnat s nastavenou teplotou. Mezi další parametry, které mohou šokovou zkoušku ovlivnit, patří i počet zkoumaných vzorků a jejich rozmístění v komoře [42, 44].

Nastavení teplot komor, doby přejezdu mezi komorami a doby setrvání vzorku v komoře je nastavováno dle platných norem. Mezi tyto normy patří například:

- MIL-STD-202-107,
- MIL-STD-750-1056,
- MIL-STD-810-503,
- MIL-STD-883-1010,
- JESD22-A106,
- JESD22-A104 [4, 42, 43],

V této práci byla využita norma JESD22-A104-B [45]. V následující *Tab.1* jsou uvedeny možné testovací podmínky s nastavovanými maximálními ( $T_{\max}$ ) a minimálními ( $T_{\min}$ ) nominálními teplotami jednotlivých komor.

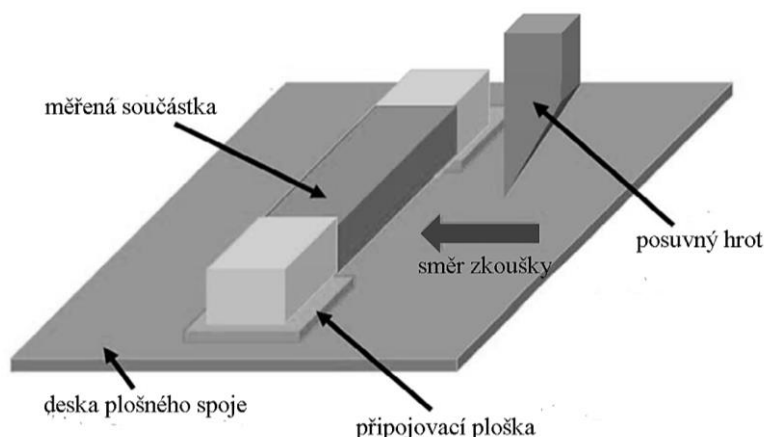
Testovací podmínka	$T_{\min}$ (°C)	$T_{\max}$ (°C)
A	-55(+0,-10)	+85(+10,-0)
B	-55(+0,-10)	+125(+15,-0)
C	-65(+0,-10)	+150(+15,-0)
G	-40(+0,-10)	+125(+15,-0)
H	-55(+0,-10)	+150(+15,-0)
I	-40(+0,-10)	+115(+15,-0)
J	-0(+0,-10)	+100(+15,-0)
K	-0(+0,-10)	+125(+15,-0)
L	-55(+0,-10)	+110(+15,-0)
M	-40(+0,-10)	+150(+15,-0)

*Tab. 1 – Testovací podmínky JESD22-A104-B [45]*

## 2.1.2 Mechanická zkouška smykem

Mechanická zkouška smykem se řadí mezi destruktivní zkoušky, které jsou založeny na určení maximální smykové síly potřebné k porušení pájeného spoje dvoupólové SMD součástky. Princip zkoušky spočívá v posuvu železného hrotu konstantní stanovenou rychlostí v rovnoběžném směru s rovinou DPS, přičemž hrot postupně tlačí na tělo připájené součástky. Test končí, když se součástka oddělí od DPS. Tato metoda se zakládá na předpokladu, že degradovaný spoj obsahující různé defekty má sníženou pevnost, a tudíž je zapotřebí menší síla na odtržení připájené součástky od DPS. Důležitým faktorem zkoušky je správné umístění hrotu, aby byly pájené spoje namáhány rovnoměrně. Kromě maximální síly smyku

se při této zkoušce může vyhodnocovat i místo a způsob poruchy spoje či samotné součástky. Princip této zkoušky je znázorněn na Obr. 12 [4, 46, 47]



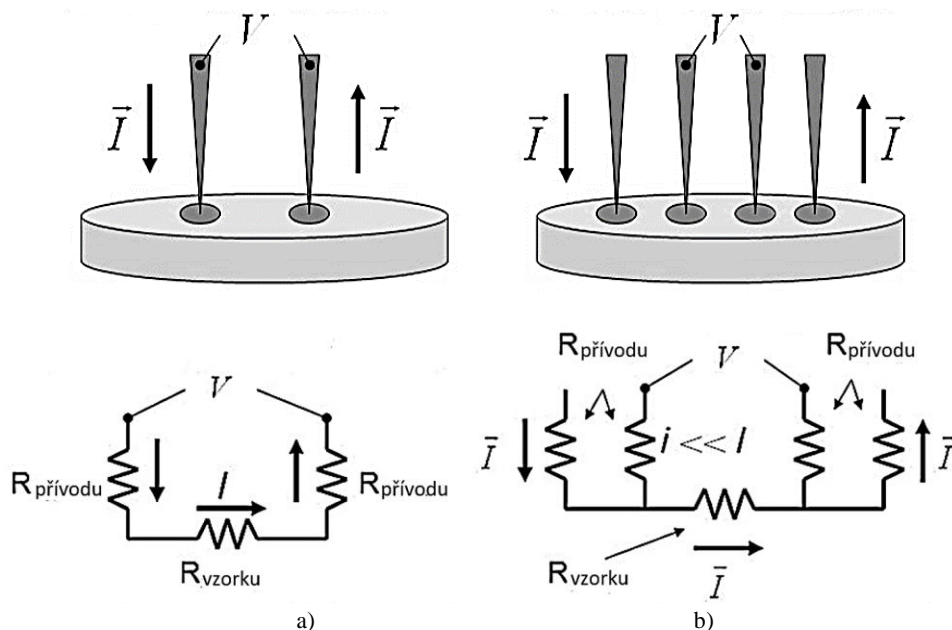
Obr. 12 – Princip mechanické zkoušky smykem [47]

### 2.1.3 Měření elektrického odporu dvoubodovou a čtyřbodovou metodou

Princip dvoubodové metody měření spočívá v injektování proudu mezi dvě elektrody a měření rozdílu potenciálu mezi těmito sondami. Metoda je určena pouze pro měření velkých odporů, neboť výsledná hodnota rezistivity v sobě zahrnuje i přechodové odpory sond, které jsou v sérii s měřeným vzorkem. Při měření odporů pájených spojů se měřená rezistivita pohybuje na úrovni  $10^{-5} \Omega$ . Při takto malých hodnotách rezistivity tvoří odpory přívodních sond zásadní chybu měření [4, 48, 49].

Měření odporu pomocí čtyřbodové metody je založeno na čtyřech lineárních jehlovitých měřicích elektrodách. Vnější elektrody jsou proudové a slouží k injekci proudu do měřeného objektu. Vnitřní napěťové elektrody, kterými teče jen zanedbatelný proud, jsou určeny k měření napětí mezi sondami. Oddělením elektrod injektujících proud do obvodu a elektrod stanovující elektrický potenciál se dosáhne potlačení chyby plynoucí z přechodového odporu mezi kovovými elektrodami a měřeným materiálem. Tato metoda je díky vysoké přesnosti široce používána především pro měření malých odporů. Principiální a elektrická schémata obou popsaných metod měření odporu jsou znázorněna na Obr. 13 [46, 47].

Při měření odporu pájeného spoje je důležité brát v úvahu to, že se měřením získá nejen hodnota samotné pájky, ale i odpor intermetalické vrstvy, pájené plošky, kontaktní plošky součástky a přechodové odpory mezi těmito jednotlivými segmenty pájeného spoje [4].



Obr. 13 – Principiální a elektrické schéma a) dvoubodové a b) čtyřbodové metody měření odporu [51]

## 2.1.4 Konfokální mikroskopie

Konfokální mikroskopie je speciální technika světelné mikroskopie, která je založená na laserové excitaci molekul a následné detekci odraženého a fluorescenčního záření. Hlavní funkcí konfokálního mikroskopu je produkce bodového zdroje světla a potlačení nezaostřeného světla, které prochází mimo ohniskovou rovinu, což zajišťuje zobrazení hloubkových struktur silných vzorků ve vysokém rozlišení. Osvětlovací a detekční aparatury jsou při tom fokusovány na stejný bod s omezenou difrakcí. Pro vytvoření snímku celé struktury je poté nutné skenovat vzorek bod po bodu. Díky této technice je konfokální mikroskop schopen vytvořit trojrozměrný obraz struktury objemových vzorků [52, 53].

## 2.1.5 Skenovací elektronová mikroskopie

Při SEM (*Scanning electron microscopy*) dopadá na vzorek umístěný ve vakuové komoře katodou emitovaný elektronový svazek. Elektronové mikroskopy mají místo skleněných optických čoček elektromagnetické čočky ve formě cívky, které stejně jako čočky optické fokusují dopadající svazek [54–56].

Skenovaný obraz povrchu vzorku, který se vyznačuje vysokým rozlišením (až 10 nm) a velkou hloubkou ostrosti, vznikne pomocí detekce zpětně rozptýlených a sekundárních elektronů. Pro dosažení vysoké ostrosti obrazu je žádoucí, aby byly zkoumané vzorky vodivé, přičemž se zvyšujícím se provozním napětím, které se pohybuje v jednotkách kV, se dosahuje vyšší hloubky ostrosti. Při určitých podmínkách, jako je například snížení napětí v komoře, lze zkoumat i vzorky bez vodivého povlaku [54–56].

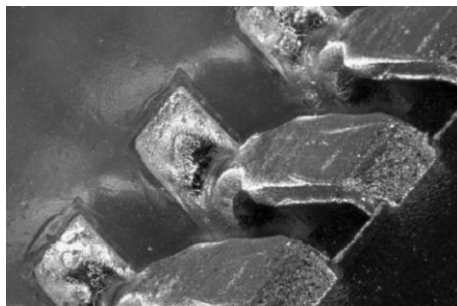
Použitím SEM lze též zjistit prvkové složení vzorku, a to pomocí detekce rentgenového záření vyzařovaného při dopadu elektronového svazku na povrch. Vzniklý obraz je černo-šedo-bílý s různým stupněm odstínů barev. Čím tmavší odstín šedi, tím má prvek nižší atomové číslo. Tmavé odstíny rovněž znázorňují různé prohlubně a výstupky ve struktuře [56, 57].

## 2.2 Defekty pájených spojů

Spolehlivost pájených spojů ovlivňují především defekty, které mohou vzniknout v jakémkoli kroku zhotovení spoje, či během normálního provozního stavu. Následující kapitoly shrnují některé vybrané problémy související s pájenými spoji, jejich možné příčiny a důsledky.

### 2.2.1 Studený spoj

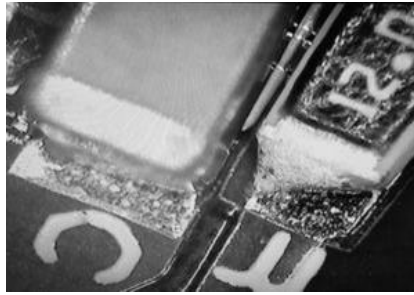
Studený spoj můžeme charakterizovat jako spoj, jehož povrch je na první pohled drsný a vykazuje nehomogenizovanou texturu. Dle normy IPC-A-610 lze tento defektní spoj definovat také jako pájený spoj, který vykazuje špatné smáčení a vyznačuje se šedavým, porézním vzhledem. Příčinou takového spoje je nejčastěji nedostatečné zahřátí pájky během pájení. V důsledku toho nedojde k odstranění oxidů z pájky a spoj se nevytvdí homogenně. Další příčinou studeného spoje může být i malá aktivita tavidla, oxidace spoje během procesu pájení nebo nadměrné nečistoty v pájce. Příklad studeného spoje viz *Obr. 14* [38, 58].



*Obr. 14 – Studený spoj na vývodu typu J [58]*

### 2.2.2 Nesmáčení

Pokud nejsou pájecí plošky během pájecího procesu dostatečně smáčeny pájecí slitinou, nevytvoří se vodivé spojení s celou pájenou plochou. Nesmáčení má tak přímý dopad na kvalitu pájených spojů. Tento defekt může být způsoben nadměrnou oxidací pájecích plošek, sníženou aktivitou tavidla, kontaminací plošek, nízkou pracovní teplotou vzhledem k teplotě tání dané slitiny špatným krytím nepájevou maskou a příliš malou tloušťkou pokovení substrátu mědi (menší než 5  $\mu\text{m}$ ). Ukázka nesmáčivého spoje je uvedena na *Obr. 15* [59, 60].



*Obr. 15 – Nesmáčivost SMD součástek [60]*

### 2.2.3 Odsmáčení

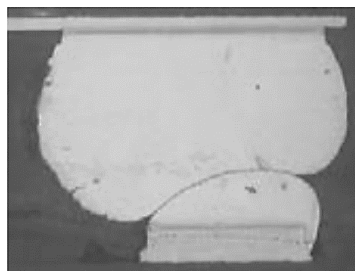
Při dlouhodobém zahřívání spoje dochází k tvorbě nesmáčivých intermetalických sloučenin, což má za následek změnu složení pájecí slitiny a odsmáčení. Příklad můžeme nalézt u cín-olovnaté pájky na měděném substrátu, kde je cín podílející se na tvorbě intermetalické vrstvy odsáván ze slitiny, a tím je v pájecí slitině zvyšován podíl špatně smáčejiho olova. Odsmáčení spoje může být též způsobeno rozpuštěním drahých kovů v pájecí slitině, či špatnou povrchovou úpravou. U bezolovnatých slitin je jednou z hlavních příčin nedostatečná aktivita tavidla. *Obr. 16* zobrazuje ukázkou odsmáčení slitiny SAC [59, 61].



*Obr. 16 – Odsmáčení slitiny SAC [61]*

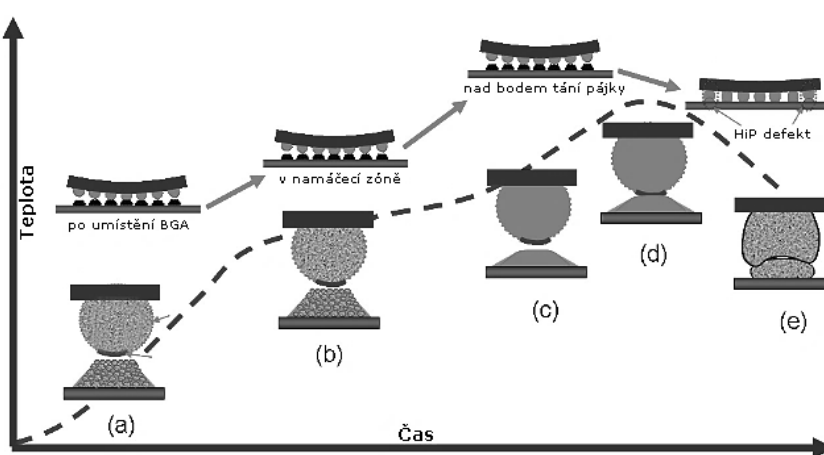
### 2.2.4 Head-in-pillow defekt

Defekt HiP lze definovat jako spoj, který se skládá ze dvou metalurgicky odlišných látek, a to z BGA kuliček a přetavené pájecí pasty, přičemž ve spoji dochází k neúplnému nebo žádnému splynutí těchto látek. Typický průřez defektu HiP je zobrazen na *Obr. 17*, kde je BGA kulička usazená na zatvrdlé pájce, ale není zde vytvořen kontinuální spoj [62, 63].



*Obr. 17 – Head-in-pillow defekt [62]*

Tvorba defektu HiP je popsána na *Obr. 18*: BGA kuličky jsou nejprve posazeny na pájecí pastu nanesenou na DPS (a). Jakmile se deska ocitne v přetavovací peci, vzroste její teplota a aktivuje se tavidlo v pájecí pastě, které na pastě a BGA kuličce redukuje oxidy (b). Následně se mezi kuličkou a pastou vytvoří mezera v důsledku dynamické deformace obalu či DPS a roztavená pájka na kuličce začne vlivem vzdušné atmosféry oxidovat (c). Po zpětném vyrovnání tvaru obalu se kulička opět dostane do kontaktu s pájkou na DPS (d). Pokud se kulička a pájka spojí dohromady, vytvoří se dobrý pájený spoj. Pokud však tavidlo v pájce není dostatečně aktivní a neodstraní oxidy vzniklé na kuličce, nebo když se mezi jednotlivé části dostanou nečistoty, nedojde ke správnému spojení DPS a pájené BGA kuličky. Po ochlazení a ztuhnutí spoje se vytvoří charakteristická vada HiP (e) [62].



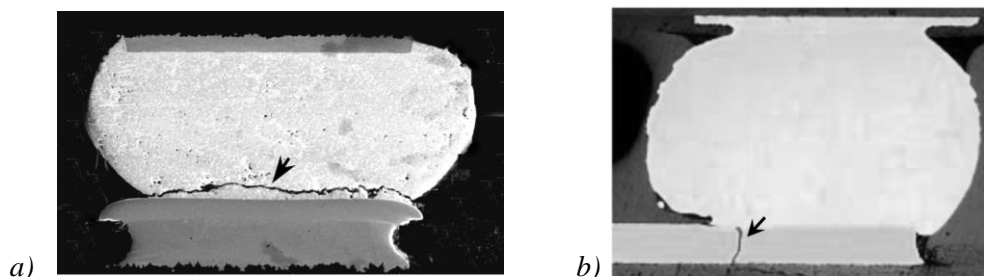
*Obr. 18 – Mechanismus tvorby HiP [62]*

## 2.2.5 Trhliny ve spojích a v laminátu

Vlivem tepla, které je během běžného provozu elektronických zařízení generováno samotným zařízením či jeho okolím, dochází k rozpínání materiálových komponent zařízení. Protože mají jednotlivé materiály různé tepelné vlastnosti, je toto rozpínání nerovnoměrné. To způsobuje deformaci pájených spojů a jejich tečení. Následkem těchto deformací způsobených změnami teplot se vytvoří trhliny, které zapříčiní zhoršení elektrické funkčnosti spoje. Výskyt trhlin se běžně kvantifikuje počtem teplotních cyklů, při kterých k trhlinám dochází [64, 65].

Trhliny se však mohou objevit nejen v pájce, ale i laminátu, ke kterému je pájená součástka připevňována. Praskání laminátu pod pájecími ploškami souvisí s mechanickým, vlhkostním a také termickým namáháním a je závislé na typu použitého laminátu. Rozšíření trhlin může způsobit utržení pájeného spoje od nosného substrátu, což má za následek úplné přerušování vodivostního propojení [66].

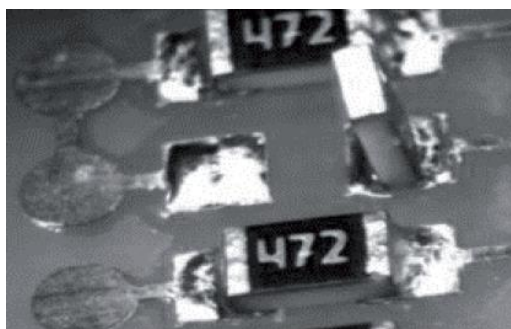
Příklad trhlin v pájeném spoji a v laminátu je zobrazen na *Obr. 19*.



Obr. 19 – Trhlina v a) pájeném spoji [65], b) v laminátu [66]

## 2.2.6 Efekt náhrobního kamene

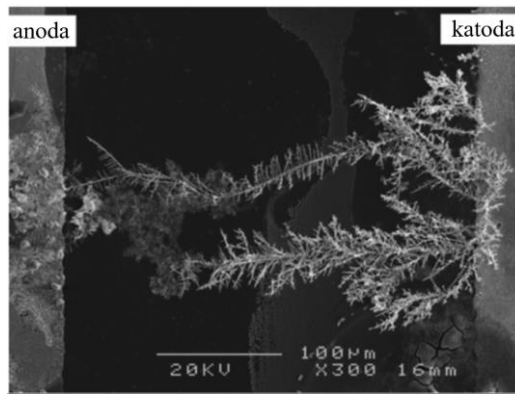
Efekt náhrobního kamene neboli *Tombstoning* se objevuje u SMT pájení přetavením. Součástky, které tento defekt postihuje, jsou „bezvývodového“ typu, tedy s terminály umístěnými přímo na tělu součástek. Tento defekt se vyznačuje tím, že po přetavení zůstane jeden konec součástky nepřipájený, zatímco druhý konec je připájen správně. To má za následek zvednutí nepřipájené části. Příčinou je nesimultánní ohřev spojů, při kterém se pájka roztaví jen na jednom konci součástky a vlivem povrchového napětí roztaveného kovu je součástka táhnuta směrem nahoru. Míra zvednutí součástky poté závisí na geometrii a hmotnosti součástky a rychlosti tuhnutí pájky. Tento defekt je zobrazen na Obr. 20 [59, 67].



Obr. 20 – Efekt náhrobního kamene [59]

## 2.2.7 Dendrity

Vznik dendritů je elektrochemický migrační jev, který je definován jako proces podmíněný přítomností elektrolytu (jako je např. voda) a napětím na DPS, při kterém je část kovu iontově přemístěna z jednoho místa na jiné. Tato elektromigrace je příčinou snížení odporu (v krajním případě vytvoření zkratu), a tudíž selhání dielektrického laminátu. Migrační ionty se tvoří vlivem aplikovaného napětí na anodě a přemísťují se směrem ke katodě. Zde jsou redukovány na kovový dendrit, který následně roste zpět směrem k anodě – viz Obr. 21. Dendrity se nejčastěji vyskytují u pájecích slitin obsahujících cín, což zahrnuje většinu pájek na trhu. Z tohoto důvodu je tato problematika velice důležitá z hlediska spolehlivosti elektronických zařízení [68].

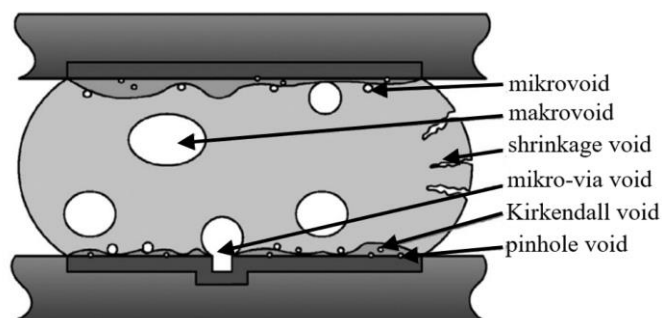


Obr. 21 – Růst dendritu [68]

## 2.2.8 Voidy

Voidy jsou nevodivé dutiny uvnitř pájeného spoje s typicky kruhovitým či oblým tvarem, které vznikají vlivem zachycení plynu či zbytků tavidel ve spoji, nedostatečnou smáčivostí, nedostatkem pájky nebo špatným přetavovacím procesem. Uvnitř těchto dutin jsou plyny tvořené směsí vzduchu a chemických složek tavidel a pájek uvolněných během pájení. Zdrojem výplně voidů může být i vodní pára, která se uvolňuje během redukce oxidů. Voidy jsou velmi nežádoucím jevem, neboť kvůli zúžení elektrických a tepelných cest dochází ke kumulaci tepla, zvýšení odporu a nerovnoměrnému namáhání spoje. Tyto všechny aspekty se velmi negativně projevují na spolehlivosti pájeného spoje [69, 70].

Voidy lze kategorizovat dle velikosti, umístění ve spoji, nebo způsobem vzniku. Jeden způsob dělení voidů je zobrazen na Obr. 22. Nejčastějším typem voidů jsou makrovoidy s průměrem 100–300 μm, jejichž vznik je především ovlivněn parametry výrobního procesu [70].



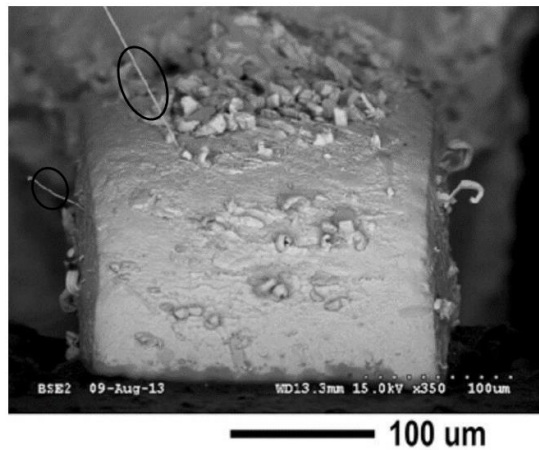
Obr. 22 – Typy voidů [70]

## 2.2.9 Whiskery

Whiskery jsou vlasovité elektricky vodivé výčnělky vyrůstající z povrchu kovové struktury. Jedná se především o cínové krystalické útvary, se kterými se můžeme setkat hlavně u povrchů s finální úpravou ve formě galvanického pocínování. Jejich délka se obvykle pohybuje v řádech jednotek mm, ojediněle mohou dosáhnout délky o něco větší než 10 mm. Hlavním



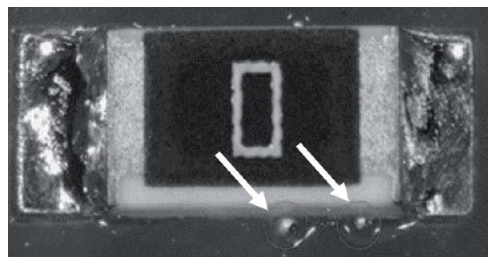
rizikem tohoto defektu je možnost vytvoření nebezpečného zkratu. Ukázka whiskerů je na *Obr. 23* [38, 71].



*Obr. 23 – Whiskery [71]*

### 2.2.10 Kuličky pájky

Kuličky pájky vyskytující se mimo pájený spoj jsou nebezpečným defektem, který může být původcem náhodného zkratu. Tyto kuličky se mohou objevit na základě nadměrného množství aplikované pájecí pasty, při kterém se částice pájky dostanou pod obal součástky při jejím umístění na DPS, či přímo na základě špatného umístění pájky. Příklad kuliček vyskytujících se pod pouzdem součástky je zobrazen na *Obr. 24* [59].



*Obr. 24 – Kuličky pájky lokalizovány mimo pájený spoj [59]*

## 3 Experimentální část

### 3.1 Cíl, motivace a průběh experimentu

Cílem experimentální části této práce bylo skrze různé metody vyjádřit spolehlivost pájených spojů mezi součástkami s různým typem vývodů na různých typech základního substrátu desky plošných spojů.

Tato práce může být v mnohém velmi užitečnou v tématice spolehlivosti pájených spojů, neboť není mnoho vědeckých prací, které by byly přímo orientovány na zkoumání spolehlivosti pájených spojů různých vývodů a typů pouzder v korelaci s různým typem substrátu. Jedna ze studií, ve které se zkoumá vliv flexibility substrátu na spolehlivost pájených spojů, je práce od doktora Liu [72], který společně se svými kolegy zkoumal pájené spoje na čípech s vývody typu BGA s využitím zkoušek tepelného cyklování. Výsledky jejich experimentů ukázaly, že tepelná únava pájených spojů se mnohem méně projevila u flexibilních substrátů oproti substrátům pevným, které vykazovaly vyšší výskyt defektů [72].

V další práci se R. Pandher a R. Bhatkal zabývali vlivem materiálu substrátu na spolehlivost vysokovýkonných LED součástek [73], přičemž byl porovnáván hliníkový substrát se substrátem typu FR4. Pro analýzu byla též použita metoda termického cyklování. Autoři práce došli k závěru, že LED vykazovaly vysokou pevnost ve smyku na substrátu FR4, naopak na hliníkových substrátech docházelo s tepelnými šoky k výrazné degradaci a pevnost ve smyku se rapidně snižovala [73].

Na tuto tematiku napsali vědeckou práci i Doktor P. Wild a jeho kolegové [74]. Tato práce byla zaměřena na hodnocení tvorby voidů a jejich vlivu na spolehlivost bezolovnatých pájených spojů MID zařízení (*Molded Interconnect device*) na různých druzích substrátu s různou povrchovou úpravou. I v této práci byla využita diagnostická metoda tepelného cyklování. Z naměřených dat bylo vyvozeno, že povrchová úprava I-Sn vytvářela dvakrát vyšší pórovitost ve srovnání s NiP-Au. U všech substrátů nevykazovalo tepelné cyklování na pájených spojích s procentuálním obsahem voidů menším než 19 % (toto procento odpovídá z hlediska spolehlivosti maximálnímu dovolenému procentuálnímu zastoupení voidů ve spoji) žádnou významnou korelaci mezi nižší pórovitostí a odhadovanou charakteristickou životností. Nakonec bylo zjištěno, že z hlediska odolnosti proti cyklickému tepelnému zatížení byl nejspolehlivějším substrátem *Vectra* – polymer složený z tekutých krystalů. Tento substrát oproti FR4 nevykazoval žádné známky degradace či delaminace a to i při desítkách tisíc termických cyklech [74].

Jak již bylo nastíněno v rešeršní části práce, pájené spoje byly podrobeny hned několika diagnostickým testovacím metodám. První metoda vyjádření spolehlivosti byla založena

na cyklickém teplotním šokování zkoumaných desek plošných spojů a byla určována na základě počtu cyklů v šokové komoře, po kterých došlo k přerušení vodivého spojení na DPS, což bylo detekováno nárustem elektrického odporu měřeného na rezistorech spojených do série. Další kroky experimentu spočívaly v přeměření elektrického odporu spojů rezistorů čtyřbodovou a dvoubodovou metodou, podrobení desek termomechanické analýze a proměření mechanické pevnosti spojů. Posledními metodami na vyhodnocení spolehlivosti byly konfokální a elektronová mikroskopie, skrze které byl zjišťován výskyt různých defektů v rámci spojů a změna tloušťky intermetalických vrstev.

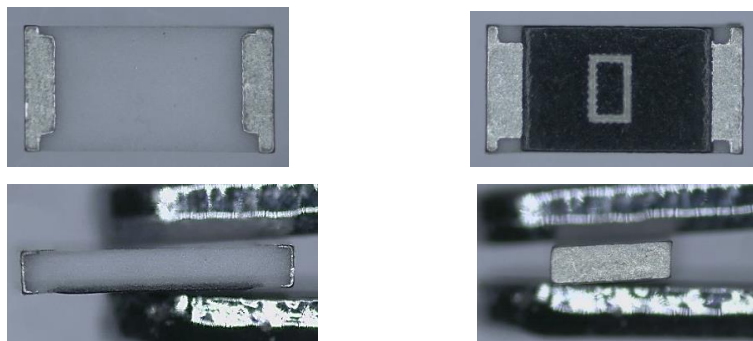
V následujících kapitolách jsou shrnuty postupy příprav vzorků k analýze, nastavení diagnostických metod a jejich průběh. Na závěr jsou představeny naměřené a získané výsledky experimentů, nad kterými je provedena diskuse.

## 3.2 Příprava experimentu

### 3.2.1 Zkoumané objekty

Před zahájením experimentu byla pomocí softwaru pro návrh desek plošných spojů *Eagle* vytvořen model DPS (zhotovený návrh je zobrazen na *Obr. 30*) s pěti typy součástek (pouzder<sup>6</sup>), na kterých měly být zkoumány tři druhy vývodů:

- tlustovrstvé rezistory s nulovým odporem – R s vývody vytvořenými přímo na tělu pouzdra, viz *Obr. 25*,



*Obr. 25 – Pouzdro typu R*

- vícevrstvé keramické kondenzátory – MLCC (*multi-layer ceramic capacitor*) vytvořený přímo na tělu pouzdra, viz *Obr. 26*,

---

<sup>6</sup> názvy pouzder uvedeny dle distributora součástek *Mouser Electronics*, od kterého byly součástky zakoupeny



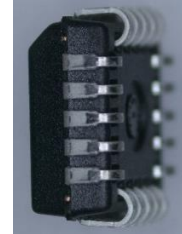
Obr. 26 – Pouzdro typu MLCC

- malé obrysové integrované obvody – SOIC (*small outline integrated circuit*) s vývody typu GW – *gull wing*, neboli „racčí křídlo“, viz Obr. 27,



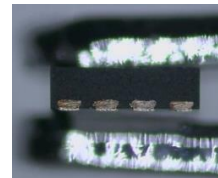
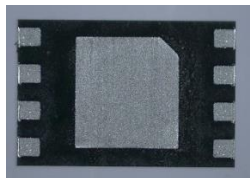
Obr. 27 – Pouzdro typu SOIC

- mikročipy – PLCC (*plastic leaded chip carrier*) s vývody typu J, viz Obr. 28,

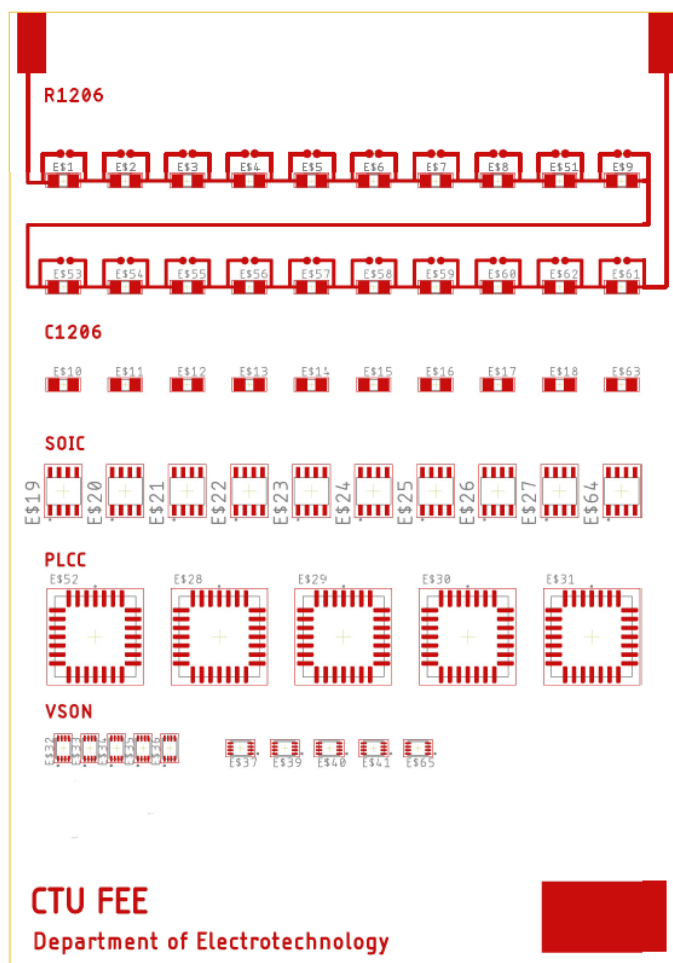


Obr. 28 – Pouzdro typu PLCC

- velmi malá obrysová plastová pouzdra – VSON (*plastic small outline*) s vývody vytvořenými přímo na tělu pouzdra, viz Obr. 29.

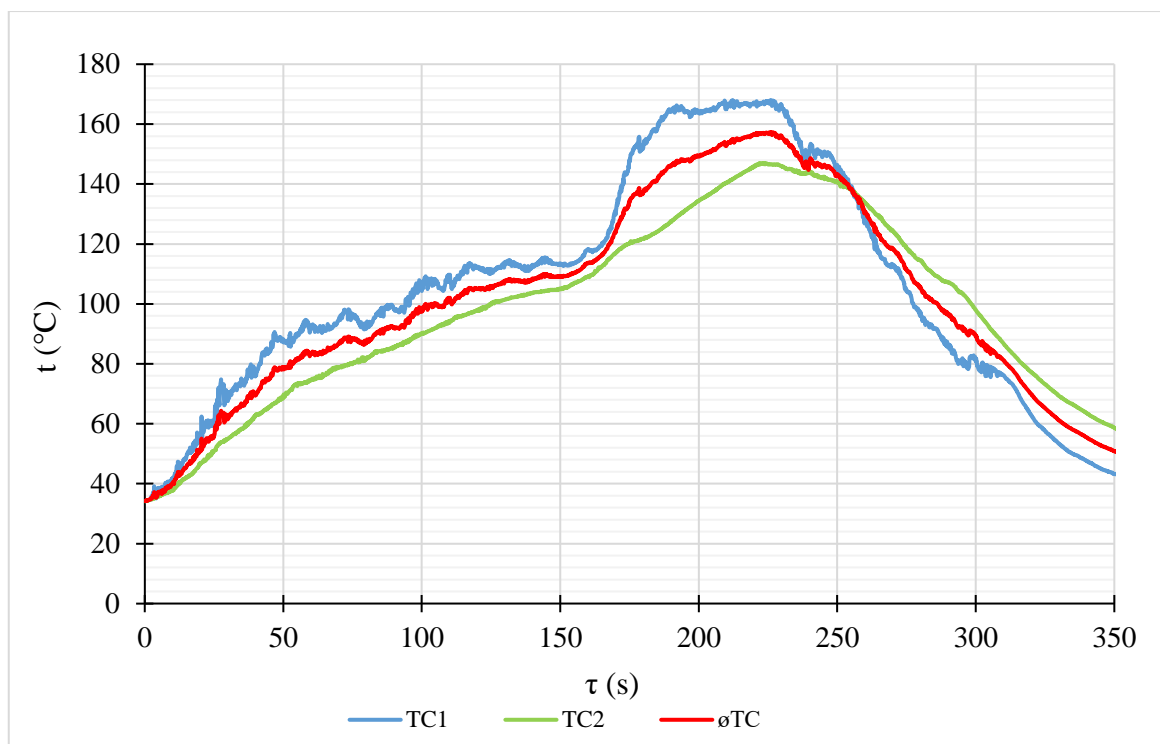


Obr. 29 – Pouzdro typu VSON



Obr. 30 – Zhotovený návrh DPS

Součástky byly na DPS připevněny bezolovnatou bismut-cínovou pastou obohacenou procentem stříbra Sn42Bi57Ag1, NC273LT AIM Solder, s teplotou tání 138 °C, která byla nanášena pomocí šablonového tisku laserem řezanou šablonou o tloušťce 100 µm. Pájení součástek bylo následně provedeno přepájením v horkovzdušné peci s nastavenou teplotou přetavení 175 °C. Tato teplota byla nastavena vzhledem ke ztížené teplotní vodivosti objemných PLCC mikročipů, které se při snížené teplotě nepodařilo připájet. Nastavený teplotní profil ukazuje *Graf 1*, na kterém je TC1 teplota naměřená na vývodu rezistoru, TC2 teplota na vývodu mikročipu a TC průměr těchto dvou křivek.

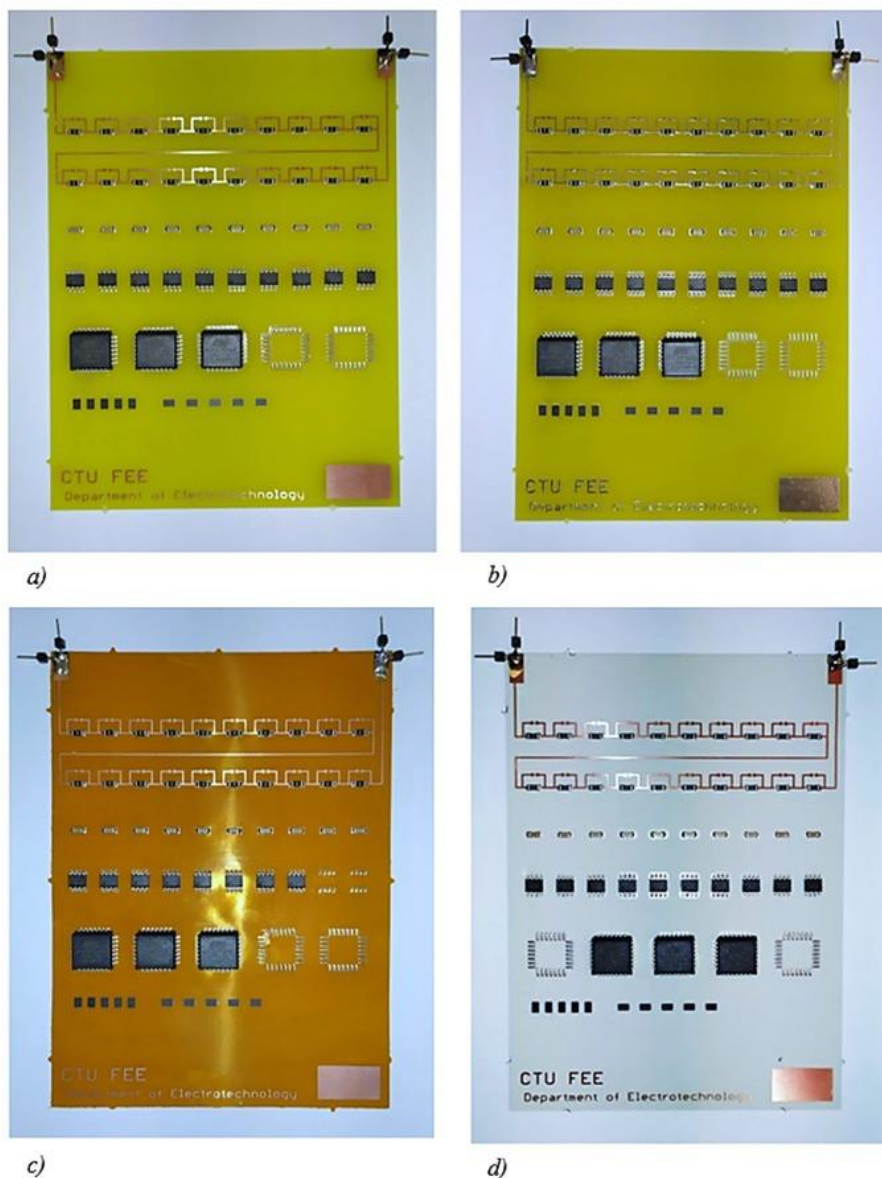


Graf 1 – Nastavený teplotní profil přepájení

Vývody součástek byly zkoumány na třech odlišných typech substrátu DPS:

- sklolaminátový epoxidový substrát – FR4,
- flexibilní fóliový polyimidový substrát – PI,
- sklolaminátový epoxidový substrát na hliníkové základně – AL.

přičemž substráty PI a AL měly povrchovou úpravu měděných plošek založenou na chemicky nanesených organických inhibítorech (OSP) a u substrátu FR4 byly kromě povrchové úpravy OSP zhotoveny i desky s povrchovou úpravou postavenou na nanesené roztavené cínové pájce – HAL. Obě povrchové ochrany mědi byly o tloušťce 1,5 mm. Celkem tedy byly zkoumány čtyři typy jednovrstvých DPS s plátováním mědi o tloušťce 35  $\mu\text{m}$ , bez nepájivé masky a bez servisního potisku. Rozměry každé desky činily 13,8x9,7 cm. Výsledné osazené desky jsou zobrazeny na Obr. 31.



Obr. 31 – Zkoumané osazené DPS: a) FR4 (OSP), b) FR4 (HAL), c) PI, d) AL

### 3.2.2 Zhotovení výbrusů

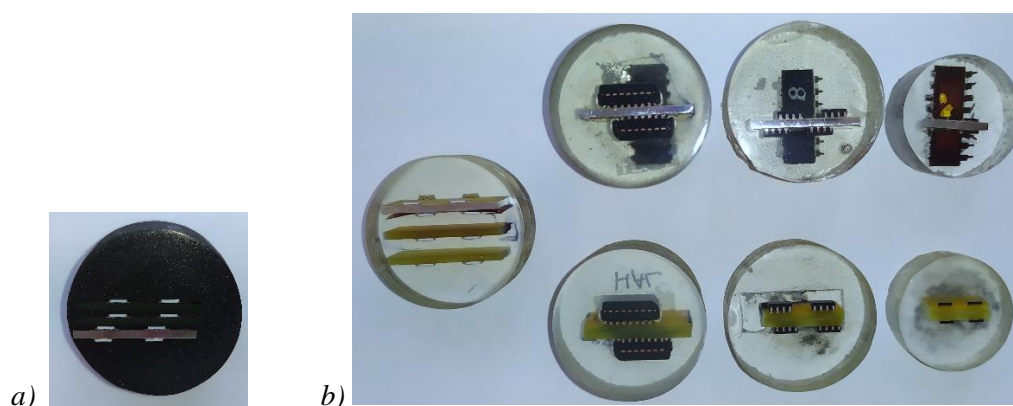
Ze všech vzorků DPS, které prošly určeným počtem cyklů, byly zhotoveny výbrusy. Celkem bylo zhotoveno 5 vodivých výbrusů, které byly určeny na vyhodnocení šířky IMC. V každém vodivém výbrusu byly čtyři typy DPS s rezistorovými součástkami, na kterých se SEM prováděla. Výroba takového výbrusu vypadá následovně: nejprve se z DPS vyříznou kusy se zkoumanými součástkami. Jednotlivé kusy se zarovnají na stejnou rovinu a očistí od nečistot. Následně se vzorky umístí do formy a zastudena se zalijí hmotou, která je namíchaná z uhlíkového prášku (ten zajišťuje požadovanou vodivost) a tvrdící hmoty v poměru 2:1. Po vytvrzení hmoty se vzorek hrubě seřízne, aby se odstranila zbytečná hmota a následně je postupně seřezáván na pile s diamantovým kotoučem až do nalezení správného řezu. Vzorek se následně



pro odstranění rýh a nerovností brousí, a nakonec je pomocí rotujícího kotouče a leštících past vyleštěn.

Pro zkoumání defektů jednotlivých typů vývodů v závislosti na typu substrátu DPS pomocí konfokálního mikroskopu byly vytvořeny výbrusy nevodivé. Výbrusy byly vyrobeny pro DPS varianty bez šokové zátěže a varianty 2000 cyklů. Princip výroby těchto výbrusů je obdobný. Rozdíl je pouze v tom, že se vzorek zalévá epoxidovou pryskyřicí bez vodivých částí smíchanou s tvrdidlem v poměru 12:100.

Ukázka zhotovených výbrusů pro variantu DPS, které prošly 2000 cykly v šokové komoře, je na *Obr. 32*.



*Obr. 32 – Výbrusy pro variantu 2000 cyklů: a) vodivý výbrus, b) nevodivé výbrusy*

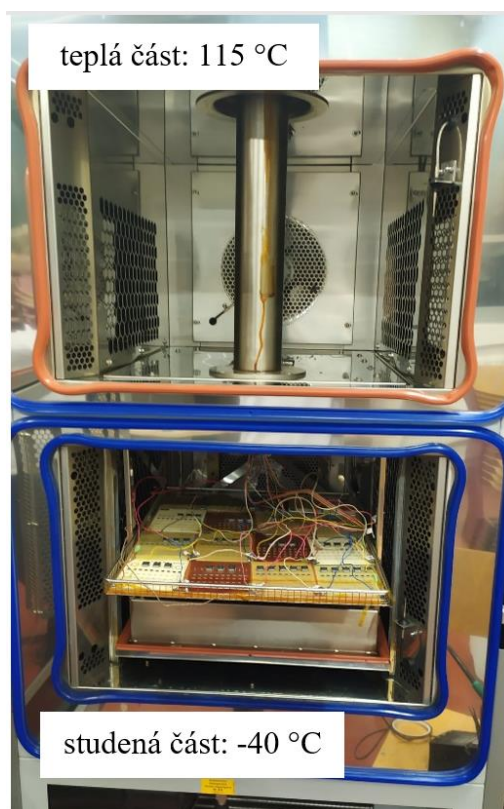
### 3.3 Parametry experimentálních metod

#### 3.3.1 Zkouška teplotním šokem

Pro analýzu vlivu teplotních šoků na spoje bylo do šokové komory *TSS 70/66*, *CTS GmbH* umístěno pět setů DPS po čtyřech variantách základního substrátu, tedy dvacet DPS. Jednotlivé sady desek prošly následně šokováním po 500, 1000, 1500 a 2000 cyklech. Každý cyklus trval půl hodiny, přičemž 15 minut byly desky umístěny v teplé části komory s teplotou 115 °C a 15 minut ve studené části komory s teplotou -40 °C. Přechod mezi komorami trval 10 sekund. Parametry zkoušky byly stanoveny na základě normy JESD22-A104-B [45].

Rezistory na dvou setech desek byly zapojeny do série a napájeny ze zdroje s konstantním proudem 200 mA a omezeným napětím 5 V. Pomocí rekordéru pro ukládání dat značky *Graphtec GL840 Midi Data Logger* se následně snímaly a ukládaly hodnoty napětí na jednotlivých deskách, podle kterých se určovalo poškození vodivých cest či spojů na vývodech rezistorů. Podělení těchto křivek vstupním proudem odpovídá změně odporu na jednotlivých deskách. Pohled do vnitřku komory se zkoumanými DPS znázorňuje *Obr. 33*.





Obr. 33 – Vnitřek šokové komory se zkoumanými DPS

### 3.3.2 Měření elektrického odporu

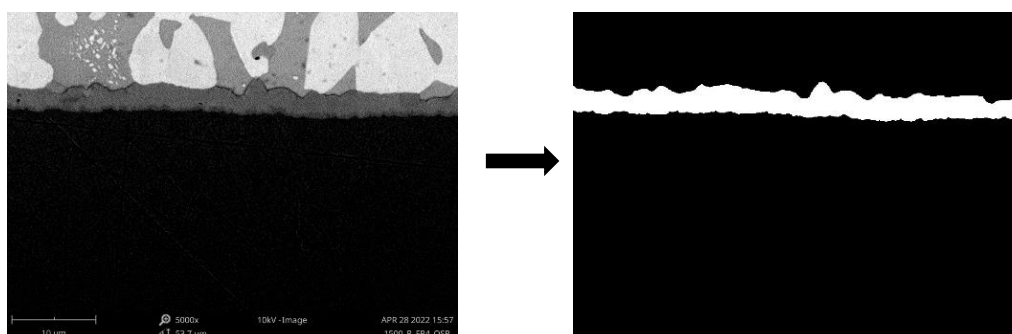
Po každých 500 cyklech byl na sériově zapojených rezistorech proměřen elektrický odpor jejich pájených spojů. Celkem bylo proměřeno na každé desce dvacet rezistorů. Pro získání hodnoty odporu spoje musela být nejprve změřena hodnota celkového odporu součástky a spoje, od které byla odečtena změřená hodnota odporu samotné součástky. Měření na deskách se substrátem FR4 probíhalo pomocí čtyřbodové metody s přístrojem *4338B Milliohmmeter. Hewlett-Packard*. Desky s PI a AL substrátem, které prošly 0 a 500 šokovými cykly, byly proměřeny stejným způsobem. Pro desky variant 1000, 1500 a 2000 cyklů byl rozsah miliohmmetru nedostatečný, a z tohoto důvodu byly tyto desky proměřeny pomocí multimetru *34401A Agilent 6.5 Digit Multimeter* zajišťující měření elektrického odporu dvojbodovou metodou.

### 3.3.3 Konfokální a skenovací elektronová mikroskopie

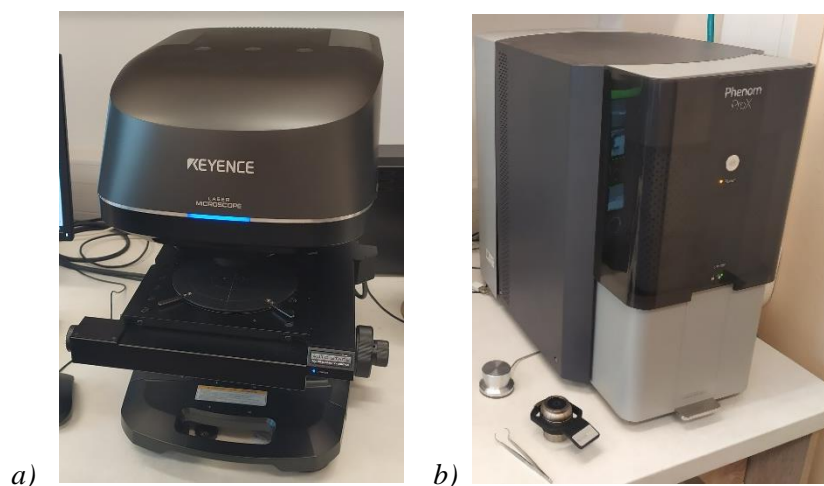
Na konfokálním mikroskopu *Laser Scanning Confocal Microscope VK-X1000, Keyence* (viz Obr. 35) byly zkoumány viditelné vady pájených spojů všech typů vývodů na nevodivých i vodivých výbrusech. Pro porovnání vzniklých vad byly snímky provedeny u DPS, které neprošly šokovou zátěží, a DPS, které prošly 2000 cykly v šokové komoře. Snímání

povrchových vad spojů bylo zhotoveno v módů *Image Observation* se zvětšením 20x při koaxiálním osvětlení vzorku.

Pomocí skenovacího elektronového mikroskopu *Phenom ProX Desktop*, *Thermo Fisher Scientific* (viz *Obr. 35*) byly zkoumány vodivé výbrusy s rezistorovými součástkami pro každý typ substrátu a každou variantu počtu cyklů v šokové komoře (0, 500, 1000, 1500 a 2000). Díky možnosti velkého zvětšení, které SEM umožňuje, byly zhotoveny při zvětšení 5000x a napětí 10 kV snímky IMC vrstev spojů. Tyto snímky byly pomocí programu *NIS Elements* uloženy do černobílé bitmapové formy a z těchto upravených snímků se v *Matlab* vypočítala průměrná šířka každé IMC vrstvy. Příklad převodu snímku ze SEM do černobílé bitmapové formy viz *Obr.34*.



*Obr. 34 – Příklad převodu snímku z SEM do černobílé bitmapové formy (varianta FR4\_OSP\_1500)*

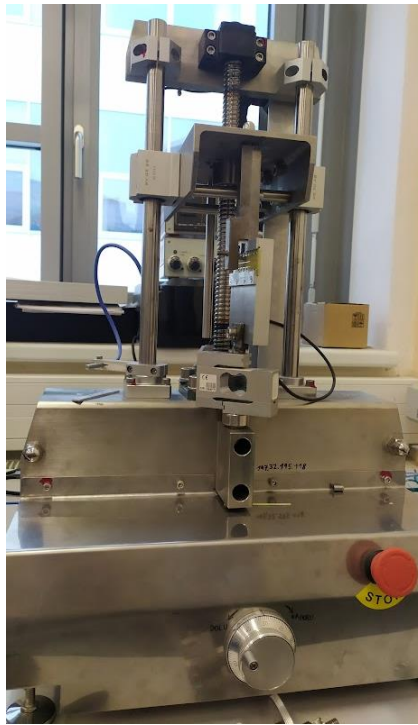


*Obrázek 35 – a) Konfokální mikroskop, b) Elektronový mikroskop*

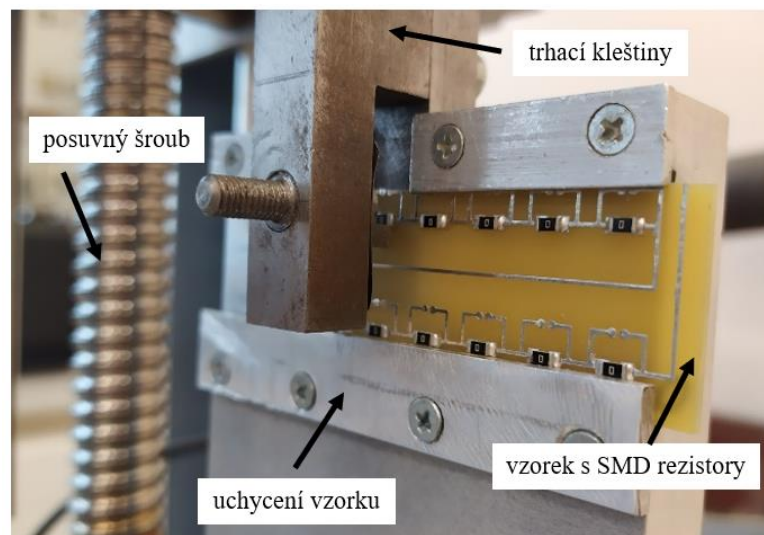
### 3.3.4 Měření pevnosti ve smyku

Pevnost ve smyku pájených spojů rezistorů byla měřena na trhacím zařízení *DEFORM 02*, *PEMAR* (zobrazeno na *Obr. 36*). Detailní zobrazení trhacího zařízení s popisem jednotlivých částí je na *Obr. 37*. Metodika tohoto měření byla provedena podle normy JEITA ET-7409/1 03 a spočívala v tom, že se vyříznutý kus desky s rezistory umístil do uchycovacího zařízení a trhacími kleštinami byla každá součástka samostatně namáhána svíslou silou

způsobenou hrotem umístěným pod součástkou, který se posouval směrem vzhůru nastavenou rychlostí 1 mm/min. Pomocí převodníku síly byla následně zaznamenávána zvyšující se síla, kterou byly pájené spoje namáhány. Konec zkoušky nastal, když se součástka odtrhla od DPS. Výsledná pevnost spojů na jedné součástce byla vyjádřena maximální dosaženou silou. Touto zkouškou prošlo na každé DPS 16 rezistorových součástek, přičemž měření bylo provedeno pro všechny varianty šokové zátěže.



Obr. 36 – Trhací zařízení

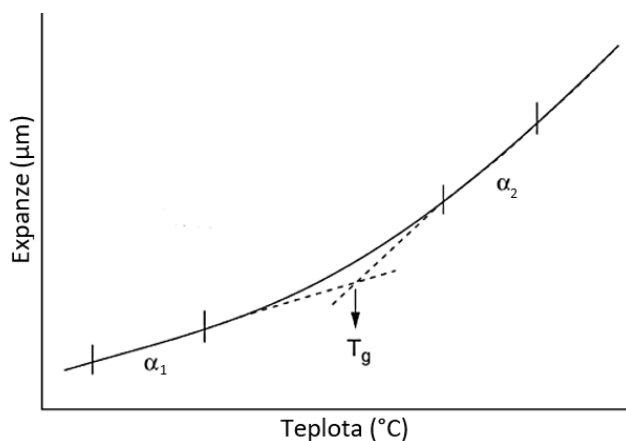


Obr. 37 – Detail uchycení vzorku během měření na trhačce

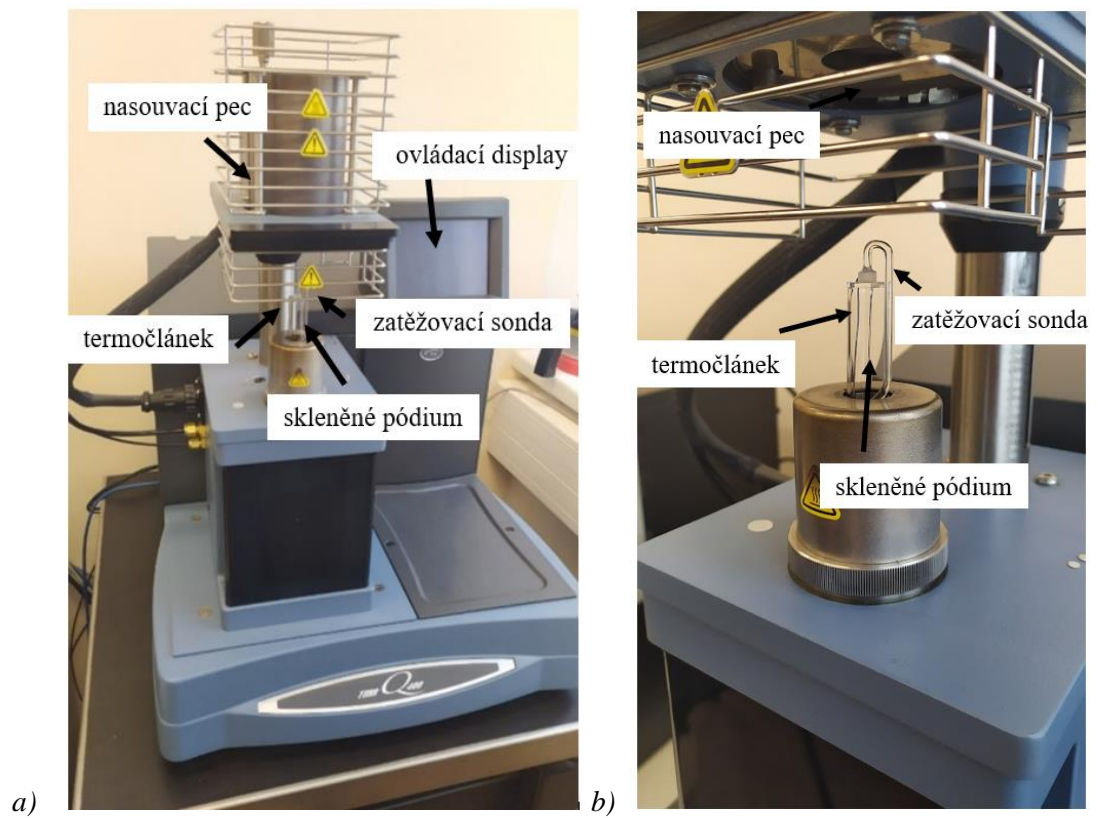
### 3.3.5 Termomechanická analýza

Jako doplňující zkouška byla provedena na TMA Q400, TA Instruments (viz Obr. 39) termomechanická analýza jednotlivých druhů substrátů DPS. Tato metoda spočívá v rozměrové analýze vzorku, během níž je vzorek podroben termickému a mechanickému zatížení. Průběh zkoušky vypadá tak, že vzorek je umístěn na skleněnou podložku, kde je následně zatěžován skleněnou sondou přednastavenou silou při současném zahřívání vzorku v nasunuté peci. Výstupem analýzy je grafická závislost expanze materiálu na změně teploty. Z tohoto průběhu lze určit například koeficient teplotní roztažnosti ( $\alpha$ ), který definuje změnu rozměru vzorku v závislosti na měnící se teplotě, a teplotu skelného přechodu ( $T_g$ ), která definuje teplotu, při níž substrát přechází z pevného stavu do stavu plastického. Příklad typického průběhu získaného z TMA společně s principem určení  $\alpha$  a  $T_g$  je na Obr. 38 [75].

Touto analýzou prošly všechny varianty desek podrobených či nepodrobených zátěži v podobě šokové komory. Pro každou variantu byly z jednotlivé zkoumané desky vyříznuty tři vzorky rozměrů cca 7x7 mm, které byly měřeny ve dvou samostatných bězích. Nastavení metody měření bylo následující: průtok dusíku 100 ml/min, zatěžovací síla expansní sondy 0,01 N, maximální teplota 200 °C (oteplovací fáze), minimální teplota 30 °C (chladicí fáze), teplotní rampa 5 °C/min. Z jednotlivých naměřených průběhů roztažnosti desek v závislosti na teplotě se určily z oteplovací i chladicí větve koeficienty teplotní roztažnosti. U substrátu FR4 (povrchové úpravy OSP i HAL) se tyto koeficienty stanovovaly pro oba sklony expanzní křivky. Teplota skelného přechodu byla stanovena u substrátu typu FR4, u substrátu PI a AL zjevný zlom expanzní křivky nenastal.



Obr. 38 – Typická expanzní křivka při TMA [75]



Obr. 39 – TMA Q400 a) celé zařízení, b) detail zařízení

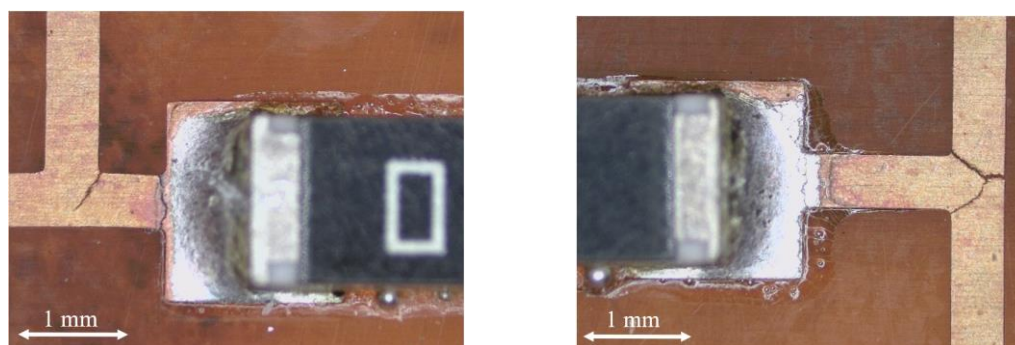


## 3.4 Výsledky experimentu

### 3.4.1 Průběh elektrického odporu během cyklování

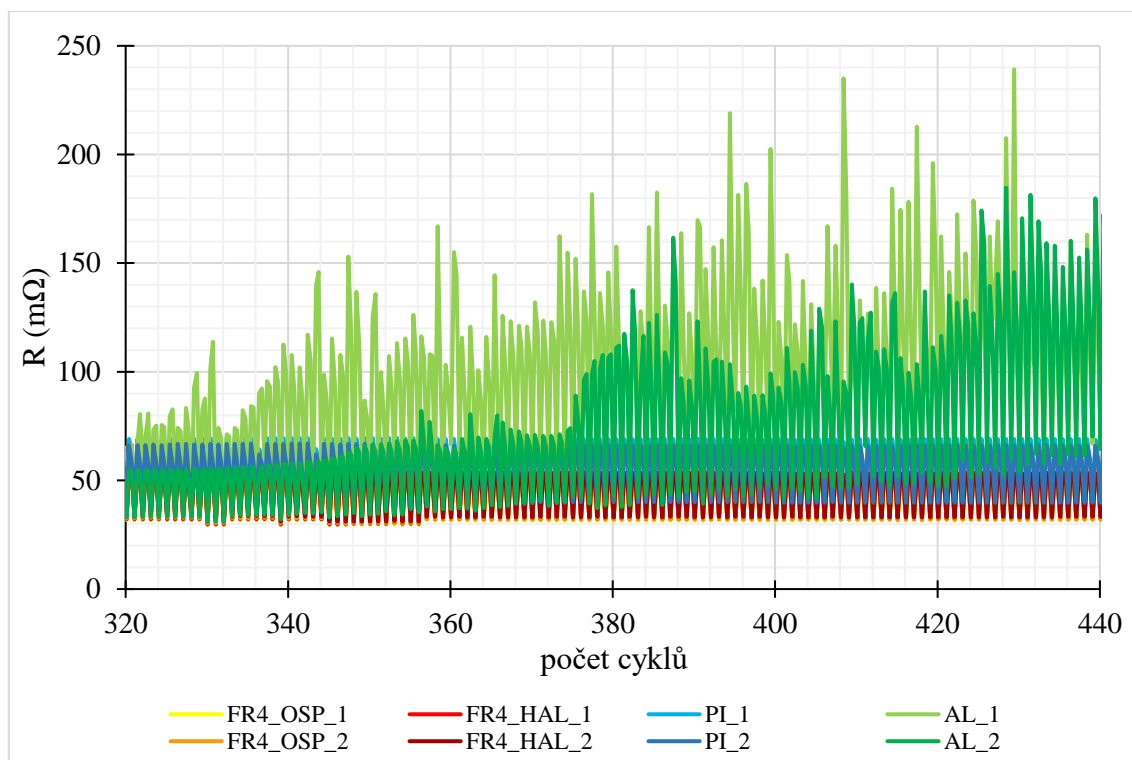
Průběh změny elektrického napětí, resp. odporu, byl sledován na dvou sadách desek. Celkem bylo tedy sledovány elektrické veličiny na osmi deskách (2x FR4\_OSP, 2x FR4\_HAL, 2x PI, 2x AL). Samotné měření se nejprve muselo v prvních stech cyklech v několika krocích optimalizovat. Důvodem bylo tepelné a mechanické rozpojování konektorů mezi měřenými deskami a snímacími vodiči, které vedlo k náhodnému zvyšování napětí na některých deskách. Tato komplikace byla následně vyřešena skrze vytvoření trvalého pájeného spojení mezi měřicími vodiči a měřenými deskami.

Na *Data Loggeru* bylo snímáno napětí, které bylo následně převedeno na odpor jedné rezistorové součástky, který zahrnoval odpor součástky i pájených spojů. Odpor na jednotlivých součástkách se pohyboval do 320 cyklů na přibližně stejné úrovni, a to  $45 \text{ m}\Omega \pm 10 \text{ m}\Omega$  (daná oscilace byla způsobená cyklickou změnou teploty), přičemž rezistory na deskách PI vykazovaly v teplé části komory odpor vyšší přibližně o  $20 \text{ m}\Omega$ . Tento jev byl způsoben částečným praskáním vodivých cest mezi jednotlivými rezistory na PI desce, viz. *Obr. 40*.

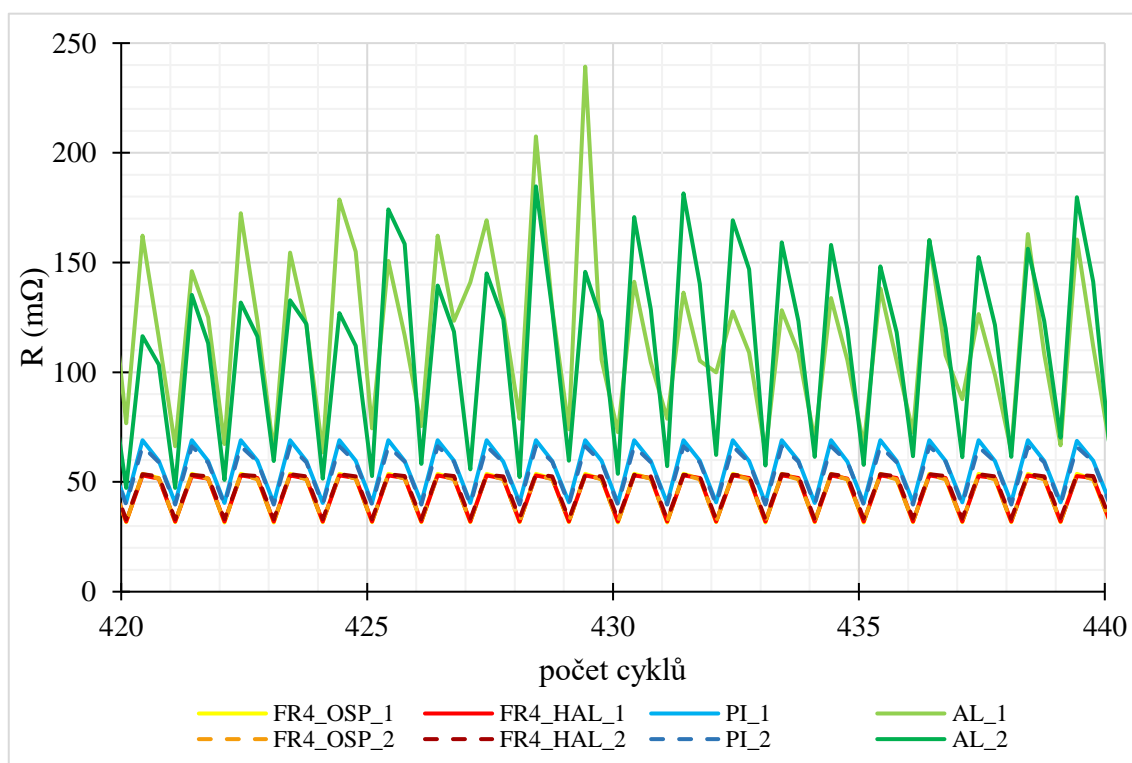


*Obr. 40 – Porušení vodivých cest na PI deskách*

Po 320 cyklech se odpor rezistorů na AL deskách s počty cyklů začal prudce zvyšovat, a to až na cca pětinašobek své původní hodnoty. Desky s typem substrátu FR4 a PI však vykazovaly hodnoty odporu stejné. Tento záznam prvotního zvyšování odporu na AL deskách je zobrazen na *Grafu 2* a podrobněji na *Grafu 3*.



Graf 2 – Ukázka záznamu nárůstu el. odporu (320-440 cyklů)

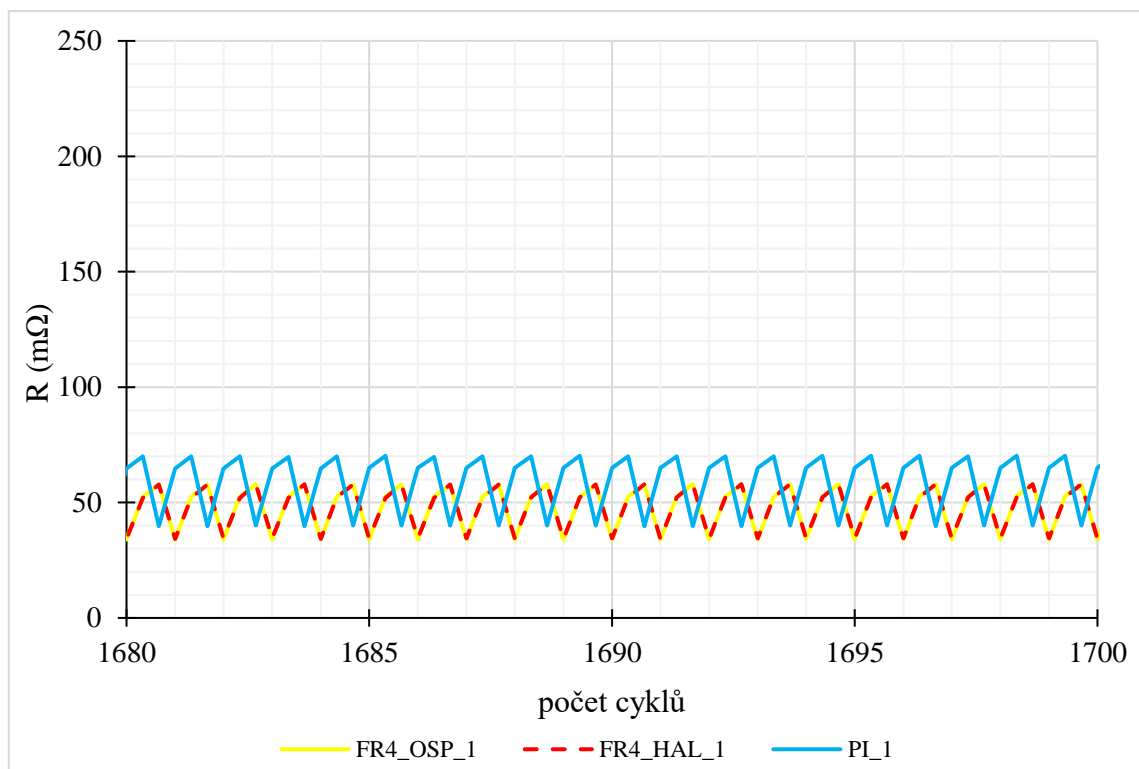


Graf 3 – Ukázka záznamu nárůstu el. odporu – podrobněji (420-440 cyklů)

S postupujícím cyklováním vykazovaly desky AL obdobný trend zvyšování odporu. Při dosažení 780 cyklů se napětí na jedné z AL desek ustálilo na 300 mΩ. Na druhé AL desce napětí dosahovalo dokonce 600 mΩ, tedy přibližně 13násobek původní hodnoty. Po skončení

1000. cyklu, kdy byl běh šokové komory přerušen, aby mohly být vyndány vzorky, byly obě AL desky z dalšího měření vynechány. Tento krok byl učiněn z toho důvodu, že jejich spoje vykazovaly značně zvýšené odpory a měřený sériový obvod ostatních desek tím byl velmi poruchový.

Odpor na vzorkách PI držel proti AL deskám téměř konstantní hodnotu. Jeho výsledná hodnota se při poslední sadě cyklů oproti původní hodnotě zvýšila jen v řádech desetin, maximálně jednotek mΩ. U desek substrátu FR4 (OSP i HAL) byla změna také jen v řádech jednotek mΩ. Ukázka průběhu napětí při poslední fázi cyklování je na *Grafu 4*.



*Graf 4 – Ukázka záznamu konečného průběhu el. odporu (1680-1700 cyklů)*

### 3.4.2 Elektrické odpory pájených spojů po cyklování

Po vystavení desek šokové zátěži na nich byl znovu změřen elektrický odpor. Ten již nebyl sledován na sériovém zapojení rezistorů, ale na každém rezistoru zvlášť. Výsledné změřené hodnoty na substrátech FR4 (OSP i HAL) a AL odpovídají průběhům snímaných během šokových testů. Naopak u flexibilního substrátu se projevil s přirůstajícími cykly určitý trend, který se během předešlého měření průkazně neukázal.

Hodnoty el. odporu pájených spojů na FR4 deskách ve všech změřených variantách se pohybovaly přibližně na konstantní úrovni, a to 3 mΩ, přičemž se zvyšujícím se počtem cyklů u desek FR4 s povrchovou úpravou HAL byl pozorován mírný přírůstek odporu spojů v řádech

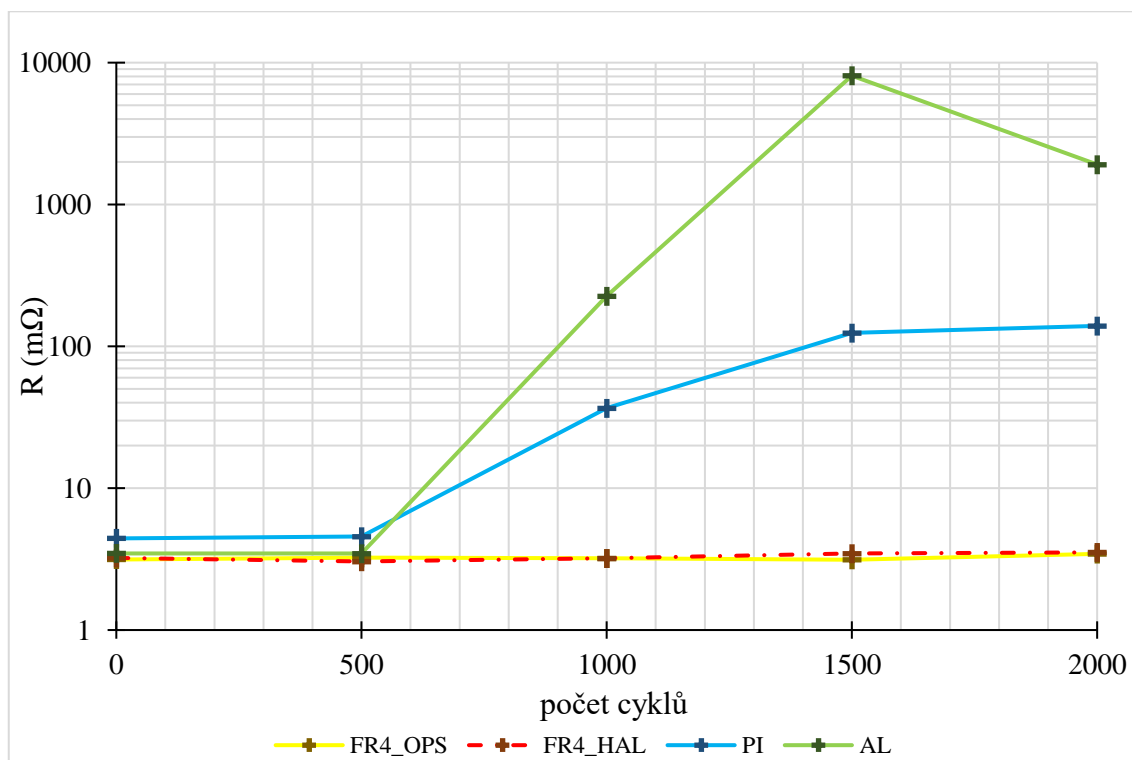


desetin mΩ. Desky FR4\_OSP měly zvýšenou hodnotu odporu především při 2000 cyklech, avšak i zde byl přírůstek pouze v řádech desetin mΩ.

U pájených spojů AL substrátu byl naměřen strmý nárůst hodnoty odporu po 1000. cyklu, kdy se odpor z 3 mΩ zvýšil na 75násobek své hodnoty, tedy 226 mΩ. S dalšími cykly se odpor dále zvyšoval. Při 1500 cyklech bylo zvýšení odporu oproti předcházející hodnotě o celý řád, spoje tedy vykazovaly markantní degradaci. U posledních vzorků spojů, které prošly 2000 cykly, již nárůst odporu nepokračoval, a jeho hodnota se pohybovala stejně jako u předešlých spojů v řádech jednotek Ω.

Pájené spoje na PI substrátech stejně jako na AL substrátech vykazovaly zvýšenou hodnotu odporu s 1000. cyklem v šokové komoře. Průměrná hodnota odporu se zvýšila z necelých 5 mΩ na 37 mΩ. Nárůst odporu nebyl tedy tak strmý jako v případě AL substrátu. U dalších sad desek, které byly ponechány v šokové komoře dalších 500 cyklů, byla pozorována tendence nárůstu odporu nižší. Tyto hodnoty byly téměř shodné s hodnotami odporů posledních desek s 2000 cykly.

Výsledná charakteristika znázorňující průměrné hodnoty el. odporu v závislosti na počtu cyklů v šokové komoře je zobrazena v logaritmické stupnici na *Grafu 5*.



*Graf 5 – Průměrné hodnoty el. odporu pájených spojů rezistorových součástek*

Soupis průměrných naměřených hodnot el. odporu spojů při jednotlivých sadách cyklů společně s uvedenými směrodatnými odchylkami naměřených hodnot je uveden v *Tab. 2*. Grafické znázornění rozptylu naměřených hodnot je pro ilustraci v příloze A.

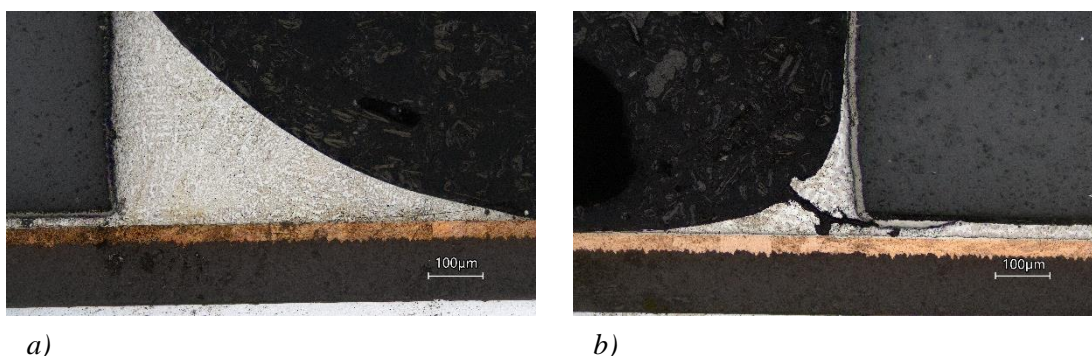
*Tab. 2 – Průměrné hodnoty el. odporu pájených spojů rezistorových součástek*

	0		500		1000		1500		2000	
	$\bar{\sigma}R$ (m $\Omega$ )	$\sigma$ (m $\Omega$ )	$\bar{\sigma}R$ (m $\Omega$ )	$\sigma$ (m $\Omega$ )	$\bar{\sigma}R$ (m $\Omega$ )	$\sigma$ (m $\Omega$ )	$\bar{\sigma}R$ (m $\Omega$ )	$\sigma$ (m $\Omega$ )	$\bar{\sigma}R$ (m $\Omega$ )	$\sigma$ (m $\Omega$ )
<b>FR4 (OSP)</b>	3,1	0,2	3,2	0,2	3,2	0,2	3,1	0,3	3,4	0,6
<b>FR4 (HAL)</b>	3,2	0,3	3,0	0,3	3,2	0,2	3,5	0,2	3,5	0,2
<b>PI</b>	4,4	0,3	4,6	0,2	36,6	8,2	124,2	87,6	139,4	64,6
<b>AL</b>	3,5	0,3	3,5	0,3	225,9	445,8	8 089,6	10 520,2	1 912,1	881,6

### 3.4.3 Vizuální zhodnocení spojů

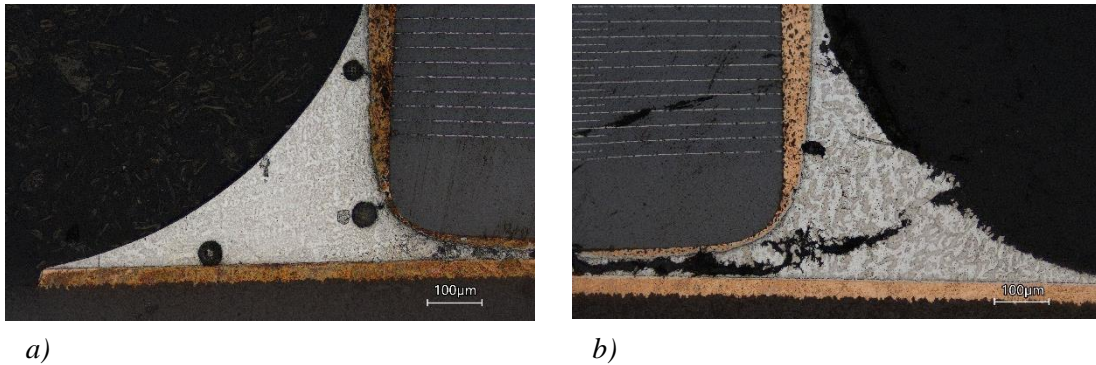
Celkem byly zkoumány pájené spoje na třech typech vývodů – vývody přímo na tělu součástky, typu GW a typu J. Tato analýza dále zahrnovala proměnou ve formě pěti typů pouzder – R, MLCC, SOIC, PLCC a VSON. Všechny snímky pořízené na konfokálním mikroskopu pro typické zástupce spojů pro jednotlivé varianty pouzder a typu substrátu DPS jsou v *Příloze B*. Snímky byly pro porovnání extrémů pořízeny pro vzorky bez šoků a vzorky s 2000 šokovými cykly.

Pájené spoje na rezistorech všech substrátů, které neprošly tepelným šokem, nevykazovaly žádné zásadní vady, které by mohly mít vliv na spolehlivost pájeného spoje. Po 2000 cyklech se u FR4\_OSP, FR4\_HAL a PI substrátu objevilo pár trhlin, a to především mezi spodní částí těla součástky a pájecí plošky. Jejich rozměr a rozsah však nebyly nijak signifikantní. Naopak u DPS s AL substrátem došlo vlivem velkých trhlin ve spoji, jež vedly skrze celý spoj, téměř k utržení součástky od pájecí plošky. Příklad pájeného spoje AL substrátu viz *Obr. 41*.



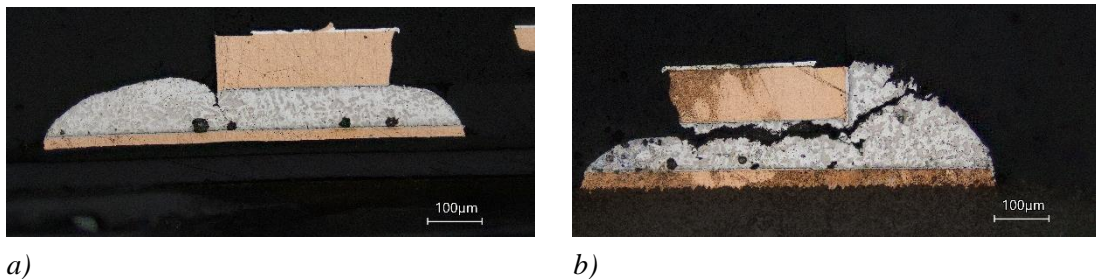
*Obr. 41 – Pájený spoj na typu součástky R, AL substrát: a) bez šoku b) 2000 cyklů*

Obdobné vlastnosti spojů měly i pájené spoje MLCC součástek, a to až na AL substrát, u kterého se vyskytovalo větší množství voidů již u vzorku bez šoku, viz *Obr. 42 a*). Při 2000 cyklech měl tento substrát též rozsáhlé trhliny, které propojily již vytvořené voidy, viz *Obr. 42 b*).



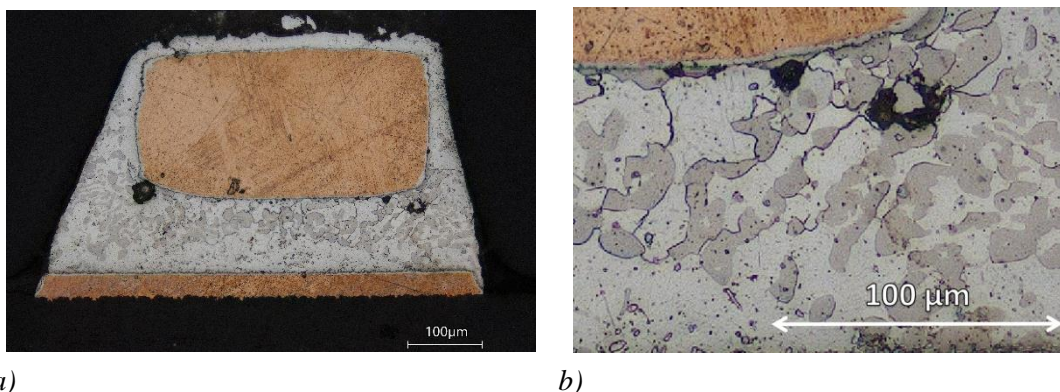
Obr. 42 – Pájený spoj na typu součástky MLCC, AL substrát: a) bez šoku, b) 2000 cyklů

U posledního typu součástky s vývody přímo na těle součástky – VSON – se objevil u všech typů substrátů větší výskyt voidů. Po 2000 cyklech se velikost voidů o něco zvětšila a ve všech spojech se objevily drobné trhlinky. Zvětšení voidů vzniklých během samotného procesu přetavení lze vysvětlit třemi způsoby: vyšší křehkost spoje mohla vést k odrolování části pájky kolem voidů, voidy mohly být nechtěně zvětšeny během procesu zhotovení výbrusu, anebo vybrané analyzované spoje po šokové zkoušce mohly obsahovat větší voidy už před zkouškou. U AL se jako v předešlých případech objevila trhlinka skrze celý spoj. Zde však již trhlinka vývod součástky od pájecí plošky zcela oddělila. Voidy s trhlinkami na PI a odtrženou součástku na AL zobrazuje Obr. 43.



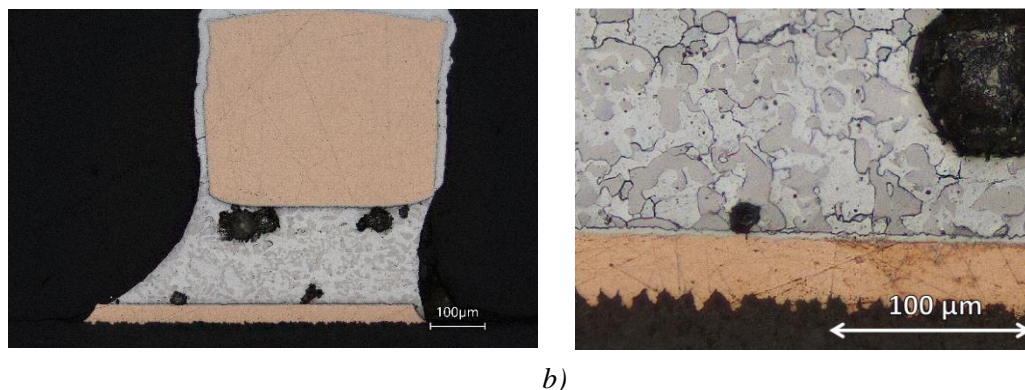
Obr. 43 – Pájený spoj na typu součástky VSON, 2000 cyklů: a) PI, b) AL

Další typ pouzdra – SOIC – se vyznačuje typem vývodu GW. Pájené spoje na DPS s PI substrátem nevykazovaly žádné defekty při 0 ani při 2000 cyklech v šokové komoře. U ostatních substrátů se vyskytovaly občasné voidy a navíc se objevily i nehomogenity rozpuštění pájky, a to především u FR4\_HAL. U vzorků po teplotním cyklování byly pozorovány větší voidy, a navíc se objevilo velké množství mikrotrhlin. Na Obr. 44 je zobrazen FR4\_HAL s mikrotrhlinami, voidy a nehomogenní strukturou u styku s pájecí ploškou.



a) b)  
 Obr. 44 – Pájený spoj na typu součástky SOIC, FR4\_HAL substrát, 2000 cyklů: a) celý spoj, b) mikrotrhliny

Pro všechny typy substrátu byl nejčtenější výskyt voidů u PLCC pouzder s typem vývodů J. Voidy se následně se šoky zvětšovaly a docházelo k jejich spojování. Dalším defektem, který tento typ vývodu po šocích postihoval, byl jako u předchozího typu vývodu vznik mikrotrhlin ve spoji. Ukázka těchto poruch u FR4\_OSP je na Obr. 45.



a) b)  
 Obr. 45 – Pájený spoj na typu součástky PLCC, FR4\_OSP substrát, 2000 cyklů: a) celý spoj, b) mikrotrhliny

### 3.4.4 Šířka IMC vrstvy

Pro každou sadu výbrusů rezistorových součástek prošlých odlišným počtem cyklů v šokové komoře byly zhotoveny na SEM snímky spojů, ze kterých se následně určovala šířka IMC vrstvy. Dle Grafu 6, který zobrazuje průměrné naměřené šířky IMC vrstev společně s jejich směrodatnými odchylkami, je zřejmé, že na substrátu FR4 s povrchovou úpravou HAL vykazoval před umístěním do šokové komory větší šířku IMC vrstvy než ostatní substráty. Hodnota této šířky byla až do 1500. cyklu konstantní a udržovala se na  $2000 \text{ nm} \pm 100 \text{ nm}$ . Po 2000. cyklu v komoře následně vzrostla cca o 30 % původní hodnoty.

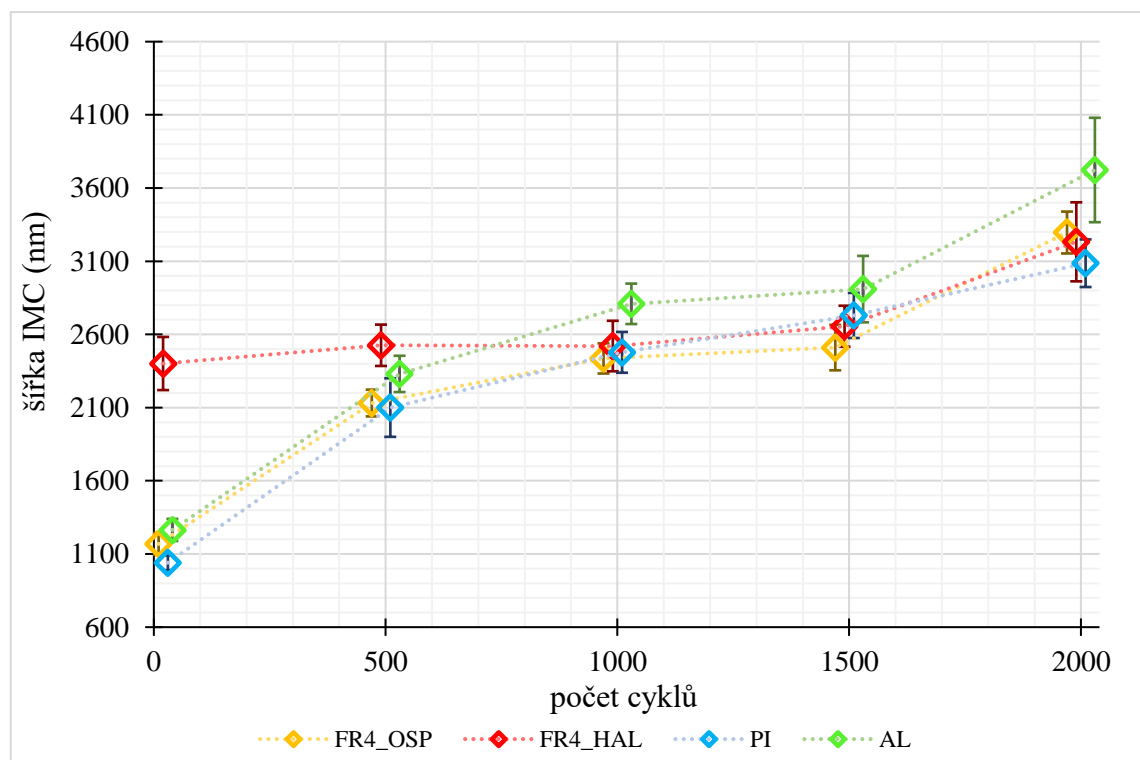
Ostatní pájené spoje na substrátech s povrchovou úpravou OSP, tedy FR4\_OSP, PI a AL, měly před šokovou zkouškou šířku IMC vrstvy okolo 1100 nm. Po první várce 500 cyklů v šokové komoře došlo k prudkému nárůstu IMC vrstvy, při kterém se šířka vrstvy u těchto desek zvýšila přibližně na dvojnásobek své původní hodnoty. S dalšími cykly docházelo k dalšímu růstu,



který již nebyl tak markantní. Na PI substrátu byla naměřena šířka IMC vrstvy nejnižší, a to jak v měření desek bez šoků, tak i po 2000. cyklu v komoře. Šířka IMC vrstvy na FR4\_OSP substrátu po 1000. cyklu odpovídala přibližně šířce substrátu FR4\_HAL, tato hodnota se v posledním měření ustanovila na cca 3200 nm.

Šířka IMC vrstvy pájených spojů na AL substrátu se zvyšovala s obdobnou strmostí jako na substrátu FR4\_OSP a PI. Velikost IMC vrstvy však u AL dosahovala v každém měření oproti zmíněným dvěma substrátům o něco vyšších hodnot. S 1000. cyklem AL substrát vykazoval dokonce šířku IMC vrstvy vyšší než FR4\_HAL substrát. Tento výsledek byl poté naměřen i u 1500. a 2000. cyklu. V posledním měření šířka IMC vrstvy na AL desce přesahovala hodnoty ostatních substrátů dokonce o více než 400 nm.

U všech substrátů docházelo se zvyšováním počtu cyklů v šokové komoře nejen ke zvýšení průměrné šířky IMC vrstvy, ale také ke zvýšení směrodatné odchylky mezi naměřenými hodnotami. Vrstvy vykazovaly v řezu méně pravidelnou šířku IMC vrstvy. Největší odchylka byla naměřena na spojích AL substrátu, a to především po 2000. cyklu.



Graf 6 – Průměrné hodnoty šířky IMC vrstvy pájených spojů rezistorových součástek

Soupis průměrných naměřených hodnot šířky IMC vrstvy pájených spojů včetně směrodatných odchylek je pro názornost zaznamenán v Tab. 3.

Tab. 3 – Průměrné hodnoty šířky IMC vrstvy pájených spojů rezistorových součástek

	0		500		1000		1500		2000	
	$\varnothing w$ (nm)	$\sigma$ (nm)	$\varnothing w$ (nm)	$\sigma$ (nm)	$\varnothing w$ (nm)	$\sigma$ (nm)	$\varnothing w$ (nm)	$\sigma$ (nm)	$\varnothing w$ (nm)	$\sigma$ (nm)
<b>FR4 (OSP)</b>	1 168,5	75,2	2 131,2	91,3	2 435,8	102,8	2 509,9	155,3	3 296,0	143,0
<b>FR4 (HAL)</b>	2 401,2	181,5	2 525,6	141,2	2 520,5	172,5	2 655,7	140,0	3 232,5	270,1
<b>PI</b>	1 040,0	50,9	2 100,3	200,1	2 477,4	139,5	2 729,4	154,1	3 086,3	162,7
<b>AL</b>	1 264,0	75,6	2 330,1	124,0	2 808,9	138,2	2 909,4	227,0	3 723,2	356,6

### 3.4.5 Pevnost spojů ve smyku

Tato destruktivní zkouška spojů ve smyku prokázala snížení pevnosti spojů vlivem teplotních šoků. Pevnost ve smyku byla vyjádřena pomocí maximální síly potřebné na odtržení rezistorové součástky. U PI substrátů se snížení pevnosti projevilo nejméně. Po prvních 500 cyklech se sice průměrná naměřená hodnota maximální síly snížila o čtvrtinu původní hodnoty, avšak s dalším zvyšujícím se počtem cyklů zůstala velikost síly na přibližně konstantní hodnotě, a to i při nejvyšším počtu cyklů v komoře.

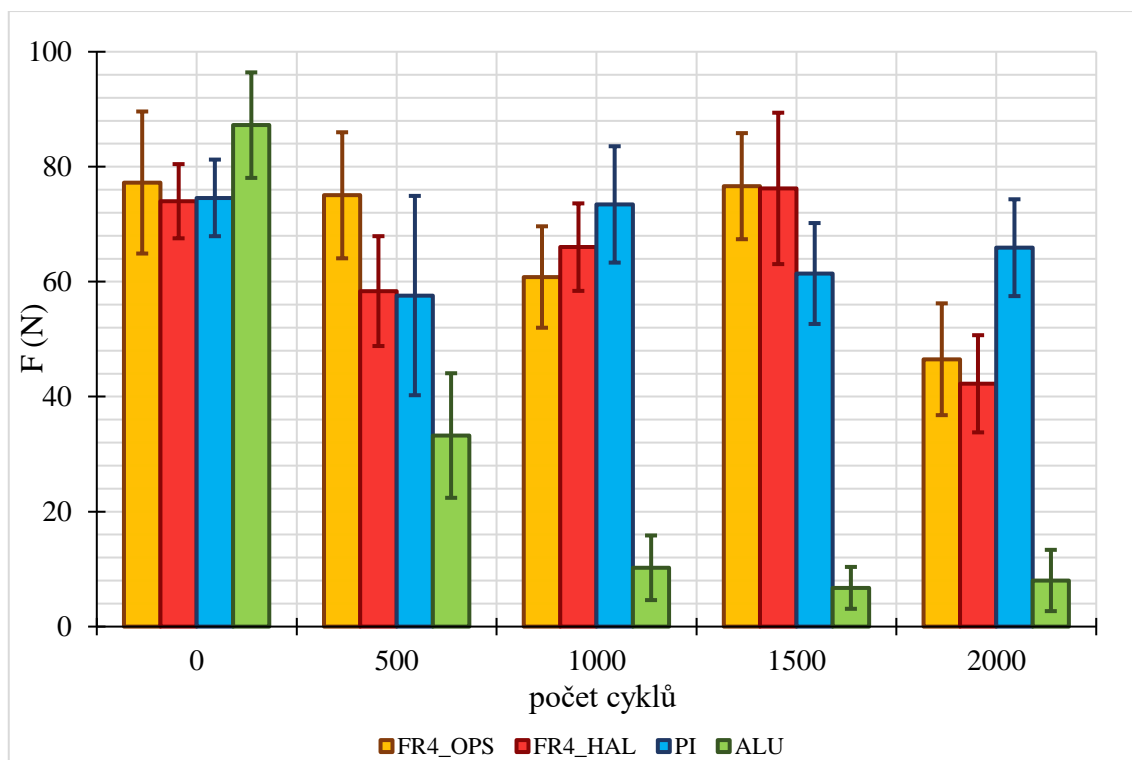
Pevnost spojů na obou FR4 substrátech nabývala v průběhu měření v jednotlivých sadách cyklů proměnné hodnoty. K jejímu výraznému snížení došlo u obou substrátů až po 2000. cyklu, kdy se pevnost u FR4\_OSP snížila ze 77 N na necelých 47 N, a u FR4\_HAL ze 74 N na 42 N. Tedy u obou nastalo snížení pevnosti cca o 40 %.

Spoje AL desek před degradací v šokové komoře vykazovaly ve srovnání s ostatními deskami nejvyšší pevnost ve smyku. Avšak již po 500. cyklu v komoře vykazovaly tyto spoje naopak pevnost nejnižší. Průměrná síla se snížila na z 87 N na 33 N, tedy zhruba na 40 % původní hodnoty. S dalšími cykly se dále pevnost snížila. Její výsledná hodnota naměřená po 2000. cyklu dosahovala jedenáctkrát menší hodnoty než hodnota získaná v prvním měření.

Průměrné naměřené hodnoty maximálních sil ve smyku včetně směrodatných odchylek jsou zaznamenány v Tab. 4 a graficky znázorněny v Grafu 7.

Tab. 4 – Průměrné hodnoty max. sil pájených spojů rezistorových součástek

	0		500		1000		1500		2000	
	$\varnothing F$ (N)	$\sigma$ (N)	$\varnothing F$ (N)	$\sigma$ (N)	$\varnothing F$ (N)	$\sigma$ (N)	$\varnothing F$ (N)	$\sigma$ (N)	$\varnothing F$ (N)	$\sigma$ (N)
<b>FR4 (OSP)</b>	77,3	12,4	75,0	11,0	60,8	8,8	76,6	9,2	46,5	9,7
<b>FR4 (HAL)</b>	74,0	6,5	58,4	9,6	66,0	7,6	76,2	13,2	42,2	8,5
<b>PI</b>	74,6	6,7	57,6	17,3	73,4	10,1	61,4	8,8	65,9	8,4
<b>AL</b>	87,2	9,2	33,2	10,8	10,2	5,6	6,7	3,6	8,0	5,3



Graf 7 – Průměrné hodnoty max. sil pájených spojů rezistorových součástek

### 3.4.6 Expanzní křivky substrátů

TMA substrátů zkoumaných DPS byla provedená pro všechny sady šokových cyklů. Jak již bylo zmíněno v metodice měření, zkouška TMA je založená na snímání expanze substrátu v závislosti na změně teploty za předem stanovené zátěžné síle. Ze získaných expanzních křivek jsou následně vyhodnoceny koeficienty teplotní roztažnosti a teploty skelného přechodu. Vyhodnocení těchto veličin je v kapitolách 3.4.7 a 3.4.8. Graf 8 zobrazuje ukázkou typických expanzních křivek substrátů, které neprošly žádnými šoky, a substrátů, které byly vystaveny 2000 šokovým cyklům.

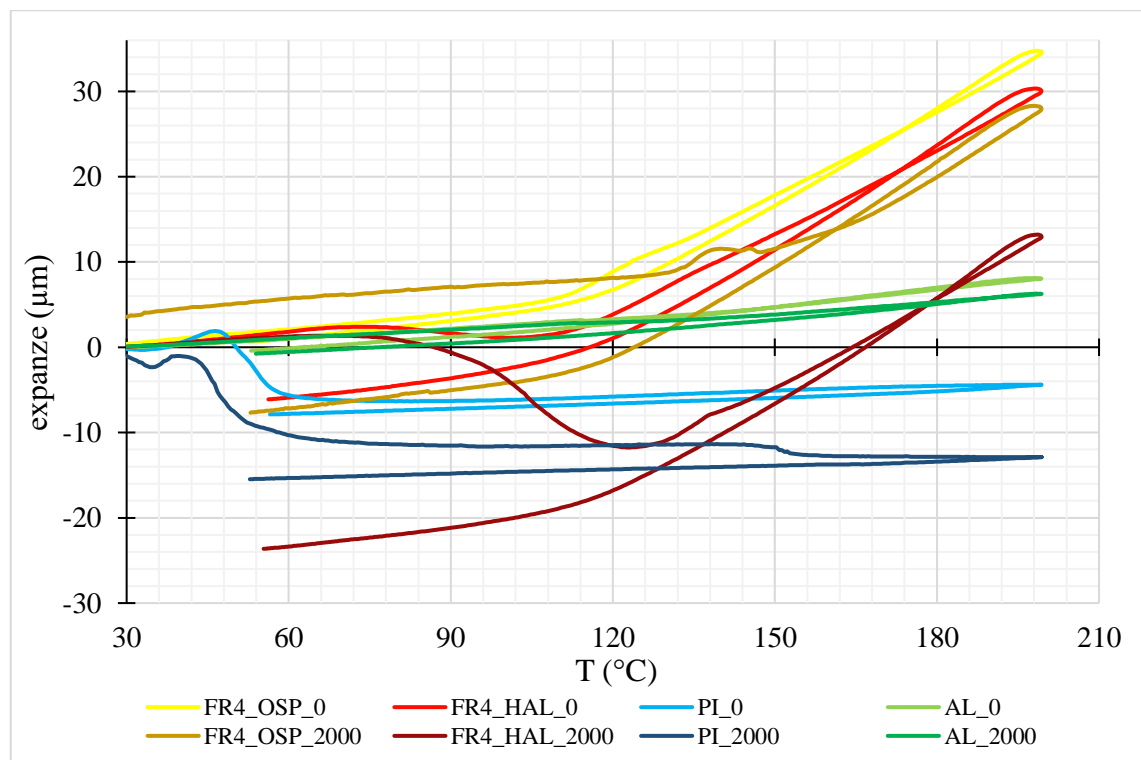
Z naměřených křivek je zřejmý charakter chování jednotlivých materiálů během termomechanického namáhání. Substrát FR4\_OSP, který neprošel tepelným šokem, se rozpínal se zvyšující se teplotou lineárně až do bodu teploty skelného přechodu, za kterým směrnice růstu expanzní křivky získala vyšší sklon a materiál se roztahoval rychleji. Vzorek tohoto substrátu prošlý šokovou komorou měl obdobný průběh s tím, že oteplovací a chladicí části křivky již neměly stejný průběh a bod  $T_g$  byl posunut do vyšších teplot, kde se zároveň zřetelně objevilo „vyboulení“ křivky znázorňující uvolňování termomechanického napětí, které materiál nabyl vlivem tepelných šoků.

U FR4 s povrchovou úpravou HAL měly expanzní křivky analogickou tendenci růstu jako u FR4\_OSP s tím rozdílem, že u HAL se projevilo uvolnění termomechanického napětí

již u vzorku, který nebyl umístěn do šokové komory. Při procesu vytváření HAL povrchové úpravy projde totiž DPS tepelným šokem při jejím ponoření do roztavené pájky. Uvolněné napětí znázorňuje nárůst a následný pokles křivky na začátku průběhu. Tento projev uvolnění termomechanického napětí se s počty cyklů v komoře násobil, jak je zřejmé i z *Grafu 8*.

Expanzní křivky PI substrátů se vyznačovaly na začátku typickým kladným výkyvem a následným poklesem křivky. Tento jev byl způsoben prohnutím flexibilního substrátu při prvotním zatížení vzorků. Následná změna rozměru materiálu měla u vzorků bez šoků lineární průběh. U vzorků, které prošly 2000 cykly, se stejně jako u FR4 substrátů objevil vliv šoků způsobující termomechanické napětí. Jeho uvolnění je znázorněno deviací křivky při cca 150 °C.

Poslední typ substrátů – AL – projevovat během všech měření jen nesignifikantní změnu rozměru bez jakýchkoli výchylek.



*Graf 8 – Expanzní křivky TMA analýzy (0 a 2000 cyklů)*

### 3.4.7 Koeficient teplotní roztažnosti substrátů

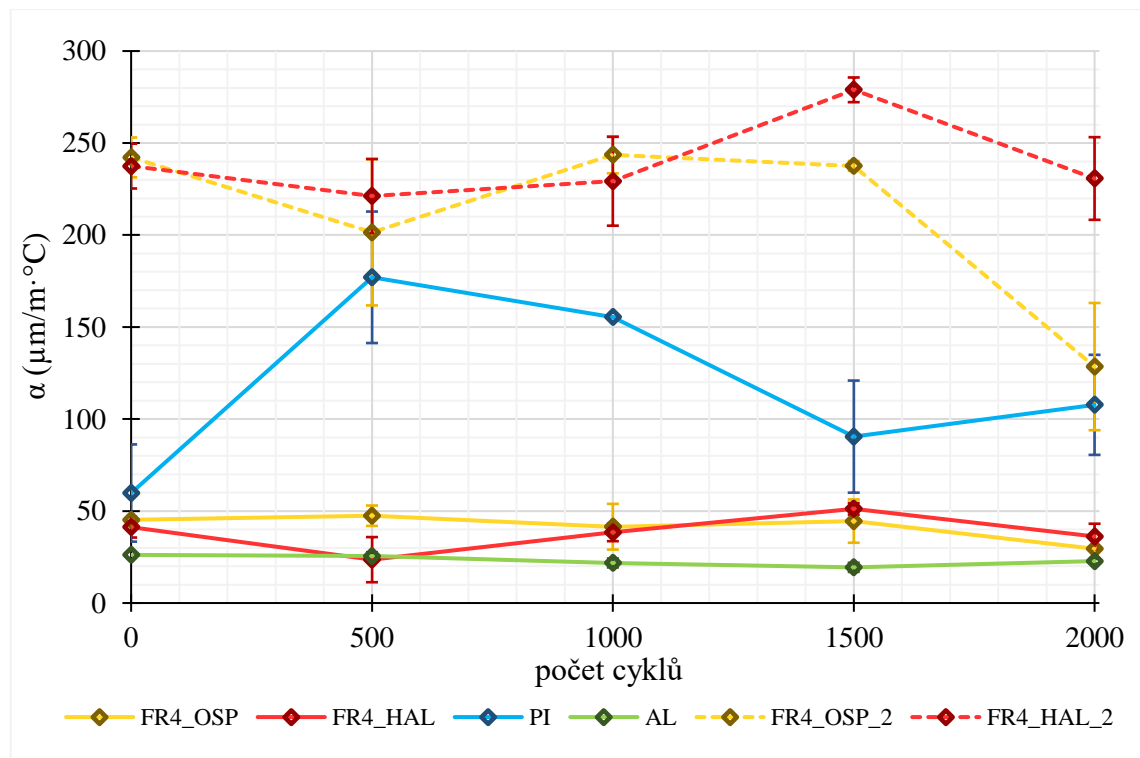
Výsledky roztažnosti jednotlivých substrátů byly již nastíněny v předešlé kapitole. Avšak pro číselnou specifikaci roztažnosti byly z expanzních křivek určeny průměrné hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti jednotlivých substrátů. Tyto hodnoty vyhodnocené dle IPC norem pro oteplovací části expanzních křivek jsou zaznamenány v *Grafu 9* a *Tab. 5. V Příloze C* jsou poté pro možnost porovnání zaznamenány výsledky vyhodnocení koeficientů i pro část chladicí.



U materiálů FR4\_OSP i FR4\_HAL byly koeficienty stanoveny pro oba sklony expanzní křivky. Je zřejmé, že do teploty skelného přechodu byla roztažnost substrátu s OSP i HAL povrchovou úpravou nižší než  $50 \mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ . Hodnota  $\alpha$  u FR4\_OSP se držela na konstantní hodnotě cca  $45 \mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$  kromě posledního měření, kde klesla na  $30 \mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ . Koeficient  $\alpha$  FR4\_HAL substrátu projevoval během měření v jednotlivých sadách cyklů měnící se trendy růstu či poklesu koeficientu. Porovnáme-li však vzorek bez šoku se vzorkem prošlým konečným počtem 2000 cyklů, je zde vidět jako v případě OSP určitý pokles, a to z  $41 \mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$  na  $36 \mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ . Za bodem teploty skelného přechodu se koeficienty  $\alpha$  u obou substrátů zvedly přibližně na šestnásobek hodnot před  $T_g$ . I v tomto případě hodnoty během měření u FR4\_OSP i FR4\_HAL nevykazovaly jasné vzestupné či sestupné trendy. Hodnoty měřené po 2000 cyklech se však opět oproti původním hodnotám snížily, u FR4\_HAL o cca  $5 \mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$  a u FR4\_OSP dokonce o  $130 \mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ .

Hodnoty koeficientů v případě PI materiálu se v průběhu měření značně měnily. Této nestabilitě hodnoty odpovídají i směrodatné odchylky průměrných naměřených hodnot, které vyjadřují různorodost naměřených hodnot. Oproti materiálům FR4 se hodnoty koeficientu vlivem tepelných šoků obecně zvýšily. Konečná hodnota koeficientu  $\alpha$  se zvýšila téměř na dvojnásobek původní naměřené hodnoty u vzorku bez šoku.

AL substrát po čas celého měření vykazoval stálou hodnotu  $24 \mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C} \pm 2 \mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ . O tomto trendu vypovídal již samotný tvar expanzních křivek.



Graf 9 – Průměrné hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti substrátů DPS

Tab. 5 – Průměrné hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti substrátů DPS

	0		500		1000		1500		2000	
	$\theta\alpha$ ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	$\sigma$ ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	$\theta\alpha$ ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	$\sigma$ ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	$\theta\alpha$ ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	$\sigma$ ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	$\theta\alpha$ ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	$\sigma$ ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	$\theta\alpha$ ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	$\sigma$ ( $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )
FR4 (OSP)	45,2	0,8	47,4	5,5	41,5	12,4	44,5	11,8	29,5	0,5
	242,2	10,8	201,5	39,7	243,6	10,1	237,6	2,7	128,5	34,6
FR4 (HAL)	41,3	5,7	23,6	12,3	38,4	4,7	51,2	3,2	36,1	7,0
	237,5	12,2	221,2	20,2	229,2	24,1	278,9	6,7	230,7	22,5
PI	59,8	26,4	177,0	35,7	155,4	0,0	90,4	30,5	107,7	27,2
AL	26,2	0,2	25,5	2,0	21,8	2,4	19,4	2,4	22,7	1,3

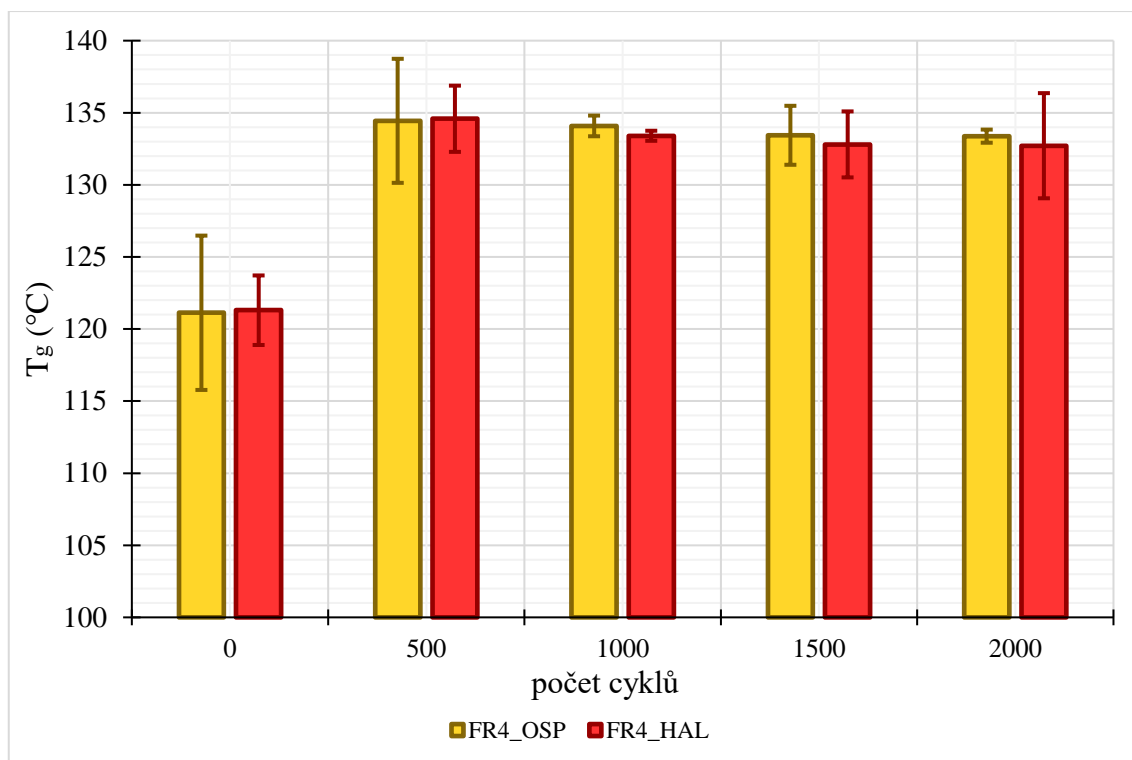
### 3.4.8 Teplota skelného přechodu FR4 substrátů

Teplota skelného přechodu vyjadřující změnu polymerního substrátu z pevné struktury na strukturu měkkou byla sledována pouze u DPS s FR4 substrátem, neboť u zbylých dvou typů substrátu (PI a AL) při nastavených parametrech TMA zkoušky změna struktury nenastala. Vyhodnocení  $T_g$  bylo následně provedeno na základě postupů dle IPC norem pouze pro oteplovací část expanzní TMA křivky. Výsledky této zkoušky ukázaly u obou typů povrchové úpravy FR4 substrátu zvýšení  $T_g$  vlivem první várky tepelných šoků. Při dalších cyklech již zvýšení této teploty nenastalo. Teplota skelného přechodu se v obou případech zvýšila přibližně o 12 °C, a to z 121 °C na 133 °C. Hodnota  $T_g$  u OSP substrátu však měla být dle předpokladu u vzorků bez šoku vyšší než u HAL, a to kvůli absenci šoku během výroby, který u HAL způsobil termomechanický stres [76]. Tento výsledek však naměřen nebyl. Důvodem je s největší pravděpodobností nedovytvrzelý materiál dodaný výrobcem. Zvýšení hodnoty  $T_g$  u obou substrátů během teplotního cyklování bylo zřejmě způsobeno dovytvrzením epoxidové pryskyřice obsažené v FR4.

Hodnoty  $T_g$  byly však stejně jako u předešlé analýzy změřeny z důvodu komplexity jak pro oteplovací, tak i chladicí část expanzní křivky. Průměrné hodnoty veškerých naměřených hodnot jsou v Příloze D. V Tab. 6 a na Grafu 10 jsou shrnuty výsledky pro oteplovací část expanzní křivky.

Tab. 6 – Průměrné hodnoty teplot skelného přechodu FR4 substrátů

	0		500		1000		1500		2000	
	$\theta T_g$ (°C)	$\sigma$ (°C)	$\theta T_g$ (°C)	$\sigma$ (°C)	$\theta T_g$ (°C)	$\sigma$ (°C)	$\theta T_g$ (°C)	$\sigma$ (°C)	$\theta T_g$ (°C)	$\sigma$ (°C)
FR4 (OSP)	121,1	5,4	134,4	4,3	134,1	0,7	133,4	2,0	133,4	0,5
FR4 (HAL)	121,3	2,4	134,6	2,3	133,4	0,3	132,8	2,3	132,7	3,6



Graf 10 – Průměrné hodnoty teplot skelného přechodu FR4 substrátů

### 3.5 Diskuse a závěr experimentu

Spolehlivostní analýza pájených spojů byla z hlediska zvyšování elektrického odporu provedena na rezistorových součástkách dvěma způsoby měření, a to sledováním okamžitých hodnot el. odporu již během šokové zkoušky a proměřením odporu po skončení určené sady počtu cyklů. Obě měření potvrdila, že se zvyšujícím se počtem cyklů spoje na obou typech FR4 substrátů (OSP i HAL) udržovaly konstantní hodnotu el. odporu po celou dobu měření. Naopak u AL substrátu došlo k významnějšímu zvyšování el. odporu po 320 cyklech. Úplné selhání spojů z hlediska elektrických vlastností projevil tento substrát s 1000. cyklem. Důvodem tohoto zvyšování odporu byla velká tepelná vodivost AL substrátu, která zapříčinila vyšší tepelné namáhání spojů a podnítila vznik defektů ve spoji. Tento výsledek potvrdily i následné zkoušky. PI substrát vykazoval mírně zvýšenou hodnotu el. odporu již od počátku měření v šokové komoře vlivem částečně popraskaných cest mezi jednotlivými rezistory na povrchu substrátu. Markantnější nárůst odporu jednotlivých spojů byl po šokování v komoře naměřen u 1000. cyklu, avšak další strmost nárůstu odporu mající negativní vliv na spolehlivost pájeného nebyla tak signifikantní jako u AL.

Výsledky vizuální zkoušky pájených spojů rezistorových součástek potvrdily předešlou zkoušku měření el. odporu. Vlivem tepelných šoků měla všechna „bezvývodová“ pouzdra na AL substrátu největší tendenci ke vzniku rozsáhlých a nebezpečných trhlin, které mohou způsobit

snížení el. vodivosti spoje a krajně až oddělení součástky od DPS. To je způsobeno již zmíněnou vysokou tepelnou vodivostí a kapacitou AL materiálu, která degradaci urychluje. „Bezvývodové“ součástky jsou k povrchu DPS z daných typů vývodů nejbližší a zároveň je mezi vývodem a pájecí ploškou nejmenší množství pájky. To způsobuje rovnoměrné prohřátí spoje, které sice během pájení přetavením zabrání vzniku voidů a podpoří jeho homogenitu, avšak následnými šoky dochází k rychlejší degradaci. Defekty ve formě voidů se ale nejčastěji na všech druzích substrátu vyskytovaly u typu vývodu J na pouzdru PLCC. Výskyt těchto voidů lze odůvodnit tím, že součástka PLCC kvůli svému velkému objemu nebyla během pájení přetavením zcela homogenně prohřátá stejně jako pájený spoj pod ní. U vývodů typu J společně s typem GW byl vlivem šoků též zaznamenán vznik mikrotrhlin, který by při jejich rozšíření po celém spoji mohl vést ke vzniku velkých trhlin a snížení elektrické vodivosti spoje.

Vysoká tendence růstu IMC vrstvy má obecně negativní dopad na spolehlivost pájeného spoje, neboť IMC může přispívat ke křehkosti spoje. Nejvíce se tato tendence růstu IMC vlivem tepelných šoků projevila u AL substrátu, kdy se šířka IMC vrstvy zvětšila na trojnásobek své původní hodnoty. Naopak FR4 substrát s povrchovou úpravou HAL vykazoval konstantní šířku IMC vrstvy až do 2000. cyklu, kdy došlo k jejímu zvýšení. Stálost šířky IMC vrstvy je u dané povrchové úpravy podnícena ponořením do roztavené slitiny, kterým DPS při dané úpravě projde. Tento proces způsobí vznik iniciační IMC vrstvy (která je přítomna ještě před procesem pájení), která pak tvoří jakousi difuzní bariéru pro její další nárůst během stárnutí. Radikálnější zvětšení IMC vrstvy bylo po 2000. cyklu pozorováno u všech substrátů, přestože u předešlých dvou sad cyklů nebyly šířky IMC tolik rozdílné. Důvodem většího přírůstku IMC mezi 1500. a 2000. cyklem může být zatím nepopsaný fenomén, jehož příčiny by mohly být předmětem dalšího zkoumání, případně se může jednat o chybně provedený metalografický výbrus, kdy zhotovená rovina řezu výbrusu nemusela být dokonale kolmá k rovině DPS. K posunu vzorků (vyřezaných částí DPS) mohlo dojít při procesu zalévání do zalévací hmoty.

Zvýšenou degradaci pájených spojů rezistorů na AL substrátu potvrdila též zkouška pevnosti spojů ve smyku. Vlivem teplotních šoků se pevnost těchto spojů radikálně snížila na desetinu původní hodnoty, což koresponduje s výskytem rozsáhlých trhlin ve spoji. Nejmenší vliv šoků na pevnost projevil PI substrát, u kterého se pevnost nejprve vlivem první sady šoků snížila o čtvrtinu, avšak poté zůstala po dobu ostatních cyklů konstantní. Je zřejmé, že flexibilita substrátu napomohla ke snížení účinků termomechanického namáhání během zkoušky.

Poslední provedenou analýzou byla TMA, při které se zkoumaly termomechanické vlastnosti jednotlivých substrátů. Při vyšších teplotách projevovaly největší roztažnost substráty FR4, neboť jako jediné přešly z pevné formy do formy plastické. Tato roztažnost se vlivem vyššího počtu cyklů v šokové komoře snížila. U FR4 substrátů byla též změřena teplota skelného

přechodu, která se po první várce šoků zvýšila a dále se udržovala na konstantní hodnotě. Při teplotách nižších vykazoval největší roztažnost substrát PI, u kterého se roztažnost vlivem šoků naopak zvýšila. Substrát AL jako jediný projevoval konstantně malou hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti při vyšších i nižších teplotách a při všech sadách cyklů v šokové komoře. Právě malá teplotní roztažnost AL substrátu pravděpodobně vedla k rychlé degradaci pájených spojů z důvodu většího rozdílu teplotní roztažnosti mezi substrátem a součástkou, která je pouzdřena nejčastěji plastem.

## Závěr práce

Cílem této práce byla analýza spolehlivosti pájených spojů na různých druzích substrátů, na třech typech vývodů součástek – „bezvývodový“ typ, GW a J typ – v závislosti na počtu cyklů v šokové komoře. Celkem byly zkoumány tři druhy substrátů s povrchovou úpravou OSP, a to FR4, PI a AL. U substrátu FR4 se také zkoumala varianta s povrchovou úpravou HAL. Zhodnocení spolehlivosti pájených spojů bylo provedeno prostřednictvím pěti diagnostických nástrojů, a to měření elektrického odporu, měření pevnosti ve smyku, skenovací elektronovou mikroskopií, termomechanickou analýzu a konfokální mikroskopií. První tři druhy testů byly provedeny pro rezistorové součástky a zbylé analýzy byly již zhotoveny pro všechny typy součástek.

Největší degradace pájených spojů vlivem tepelných šoků nastala u „bezvývodového“ typu pouzdra součástek na AL substrátu, která se projevila vysokou hodnotou elektrického odporu spojů, výskytem rozsáhlých trhlin ve spojích, strmým nárůstem šířky IMC vrstvy a sníženou pevností ve smyku. Všechny tyto analýzy potvrzovaly důsledky tepelných šoků na pájené spoje AL substrátu, jako je snížení elektrické vodivosti a zvýšení křehkosti, která vede k nedostatečné spolehlivosti pájeného spoje. U samotného AL substrátu byla zjištěna termomechanická stálost projevující se konstantní hodnotou koeficientu teplotní roztažnosti substrátu. Avšak odlišná teplotní roztažnost AL substrátu a plastových pouzder součástek na DPS vedla s největší pravděpodobností k rychlé degradaci pájených spojů.

Pájené spoje na FR4 substrátech s oběma povrchovými úpravami nevykazovaly vlivem šoků nijak zásadní degradaci. Jediným problematickým aspektem FR4 oproti ostatním použitým substrátům je jeho teplota skelného přechodu, nad kterou přejde materiál do kaučkovitého stavu. V něm se roztažnost materiálu mnohonásobně zvýší oproti stavu při teplotě nižší, než je teplota skelného přechodu, kterým je tak také určena teplotní odolnost substrátu. Odlišné vlastnosti povrchové úpravy byly zjištěny pouze u měření IMC vrstev, kde HAL úprava měla při zvyšujícím se počtu cyklů konstantní zvýšenou šířku IMC, zatímco u OSP úpravy se šířka IMC vrstvy postupně zvyšovala.

Zásadní problém u flexibilního substrátu PI byl vznik prasklin vodivých cest mezi jednotlivými součástkami, jež způsobovaly zvýšení elektrického odporu na měřených deskách. Zvyšující se odpor vykazovaly však i samotné měřené pájené spoje na tomto substrátu, nárůst však nebyl tak radikální jako u AL substrátu. Pájené spoje na tomto substrátu však dosahovaly vyšší konstantní hodnoty pevnosti ve smyku, a to i při vysokých počtech cyklů v šokové komoře.

Při porovnání všech typů vývodů bylo zjištěno, že vývody typu J vykazovaly u všech typů substrátu nejčetnější výskyt voidů, které se zvětšovaly se zvyšujícím se počtem cyklů v šokové komoře. U těchto vývodů též docházelo vlivem šoků ke vniku mikrotrhlin ve spojích. Při jejich rozšíření by tyto mikrotrhliny mohly způsobit selhání pájeného spoje z hlediska elektrické vodivosti a mechanické pevnosti.

Vzhledem ke komplexnosti tématiky může být tato práce dále rozvíjena, a to například provedením zkoušek pevnosti ve smyku a měřením IMC vrstev i u ostatních typů vývodů. Další zajímavou a prospěšnou analýzou může být i analýza a metodika pro zmírnění poruchovosti vodivých cest na PI substrátu.

# Zdroje

- [1] TU, King-Ning. *Solder Joint Technology: Materials, Properties, and Reliability*. Department of Materials Science and Engineering, University of California at Los Angeles, CA, USA: Springer Science & Business Media, 2007. ISBN 978-0-387-38892-2.
- [2] STARÝ, J. a P. KAHLE. *Plošné spoje a povrchová montáž*. Vysoké učení technické v Brně, 2011. Učební text, 2.část. b.n.
- [3] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice*. 1.vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [4] PIETRIKOVÁ, A., J. ĎURIŠIN a P. MACH. *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. 1.vydání. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [5] MACH, P. Pájení v elektronice. In: [online]. Výukové univerzitní stránky - moodle.fel.cvut.cz. Praha. [vid. 2021-09-11]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/186480/mod\\_resource/content/1/Pajeni.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/186480/mod_resource/content/1/Pajeni.pdf)
- [6] BATH, Mr. Jasbir. *Lead-free Soldering Process Development and Reliability*. 1.vydání. Hoboken, USA: John Wiley & Sons Inc, 2020. Quality and Reliability Engineering. ISBN 1-119-48203-8.
- [7] VOIGT, Robert. SMT Quick Tips - Selecting a Reflow Oven. *DDM Novastar Inc*. [online]. 2016 [vid. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://www.ddmnovastar.com/smt-quick-tips-selecting-a-reflow-oven>
- [8] BALAZS, Habil Illes, Oliver KRAMMER a Attila GECZY. *Reflow Soldering: Apparatus and Heat Transfer Processes*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2020. ISBN 978-0-12-818505-6.
- [9] LEE, Ning-Cheng. *Reflow Soldering Processes*. Newnes: Elsevier Science, 2002. 1st edition. ISBN 978-0-7506-7218-4.
- [10] ILLÉS, Balázs a Gábor HARSÁNYI. Investigating direction characteristics of the heat transfer coefficient in forced convection reflow oven. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2009, **33**(4), 642–650. ISSN 0894-1777. Dostupné z: doi:10.1016/j.expthermflusci.2009.01.001
- [11] COX, M.S.M.E. Norman R. *Reflow Technology Handbook* [online]. Minneapolis: Research Inc., 1992. Dostupné z: <https://p2infohouse.org/ref/28/27662.pdf>
- [12] COOMBS, JR., Clyde F. *Printed Circuits Handbook*. Sixth Edition. USA: McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. ISBN 0-07-146734-3.
- [13] *Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red - Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení* [online]. [vid. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
- [14] TARR, Martin. Solder paste basics. *Online postgraduate courses for the electronics industry*. UK: University of Bolton [online]. 12. listopad 2010 [vid. 2021-11-21]. Dostupné z: [https://web.archive.org/web/20101112201209/http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0245\\_spb/index.html](https://web.archive.org/web/20101112201209/http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0245_spb/index.html)
- [15] PUTTLITZ, Karl J. a Kathleen A. STALTER. *Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies*. New York, USA: Marcel Dekker, Inc., 2004. ISBN 978-0-8247-5249-1.



- [16] EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Intermetallic compound. *Encyclopedia Britannica* [online]. 10. duben 2018 [vid. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/intermetallic-compound>
- [17] JALAR, Azman, Maria Abu BAKAR, Roslina ISMAIL a Abdul Razak DAUD. Statistical Aspect on the Measuring of Intermetallic Compound Thickness of Lead Free Solders. 2016, 6. ISSN 1115-7569.
- [18] TAN, Ai Ting, Ai Wen TAN a Farazila YUSOF. Influence of nanoparticle addition on the formation and growth of intermetallic compounds (IMCs) in Cu/Sn–Ag–Cu/Cu solder joint during different thermal conditions. *Science and Technology of Advanced Materials* [online]. 2015, 16. Dostupné z: doi:10.1088/1468-6996/16/3/033505
- [19] ERESKOM SMT, V.O.S. - LIBEREC. Základní typy tavidel. *erescom.cz* [online]. [vid. 2021-11-27]. Dostupné z: <http://www.erescom.cz/index4.html>
- [20] GARCIA, Leonardo R., Wislei R. OSÓRIO, Leandro C. PEIXOTO a Amauri GARCIA. Mechanical properties of Sn–Zn lead-free solder alloys based on the microstructure array. *Materials Characterization* [online]. 2010, 61(2), 212–220. ISSN 1044-5803. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchar.2009.11.012
- [21] ASPANDIAR, Raiyo, Nilesh BADWE a Kevin BYRD. Low Temperature Lead-Free Alloys and Solder Pastes. In: *Lead-free Soldering Process Development and Reliability* [online]. B.m.: John Wiley & Sons, Ltd, 2020 [vid. 2022-03-14], s. 95–154. ISBN 978-1-119-48209-3. Dostupné z: doi:10.1002/9781119482093.ch5
- [22] CHIDAMBARAM, Vivek, Jesper HATTEL a John HALD. High-temperature lead-free solder alternatives. *Microelectronic Engineering* [online]. 2011, 88(6), 981–989. ISSN 0167-9317. Dostupné z: doi:10.1016/j.mee.2010.12.072
- [23] COYLE, Richard. Lead (Pb)-Free Solders for High Reliability and High-Performance Applications. In: *Lead-free Soldering Process Development and Reliability* [online]. 1.vydání. Hoboken, USA: John Wiley & Sons Inc, 2020, s. 191–247. ISBN 978-1-119-48203-1. Dostupné z: doi:10.1002/9781119482093.ch7
- [24] ABTEW, Mulugeta a Guna SELVADURAY. Lead-free Solders in Microelectronics. *Materials Science and Engineering: R: Reports* [online]. 2000, 27(5), 95–141. ISSN 0927-796X. Dostupné z: doi:10.1016/S0927-796X(00)00010-3
- [25] ZHAO, Jie, Lin QI, Xiu-min WANG a Lai WANG. Influence of Bi on microstructures evolution and mechanical properties in Sn–Ag–Cu lead-free solder. *Journal of Alloys and Compounds - J ALLOYS COMPOUNDS* [online]. 2004, 375, 196–201. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2003.12.005
- [26] LÁNÍČEK, Robert. *Elektronika. Obvody, součástky, děje*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-25-2.
- [27] AGNIHOTRI, Nikhil. What are the different types of IC packages? *Engineers Garage* [online]. [vid. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.engineersgarage.com/ic-packages-types/>
- [28] *Recommendations for Printed Circuit Board Assembly of Infineon SON Packages* [online]. B.m.: Infineon Technologies AG. 2012. Dostupné z: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Additional\\_product\\_information\\_SON\\_packages-AN-v00\\_01-EN.pdf?fileId=db3a30433e82b1cf013e82faab2000e5](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Additional_product_information_SON_packages-AN-v00_01-EN.pdf?fileId=db3a30433e82b1cf013e82faab2000e5)
- [29] Definition of BGA. *PCMAG* [online]. [vid. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/bga>
- [30] LAMERES, Brock J. Interconnect Construction (Printed Circuit Boards). In: [online]. Course - Digital System Design. The University of Montana. 2012. Dostupné z: [https://www.montana.edu/blameres/courses/eele461/lecture\\_notes/eele461\\_module\\_04.pdf](https://www.montana.edu/blameres/courses/eele461/lecture_notes/eele461_module_04.pdf)

- [31] KHANDPUR, R. S. *Printed Circuit Boards: Design, Fabrication, Assembly and Testing*. B.m.: Tata McGraw-Hill Education, 2006. McGraw Hill professional.; McGraw-Hill electronic engineering series. ISBN 978-0-07-058814-1.
- [32] ASHELY, Emma. *Aluminium PCB, introduction and applications*. [online]. srpen 2021 [vid. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.rs-online.com/designspark/aluminum-pcb-introduction-and-applications>
- [33] DÍAZ-GONZÁLEZ, Francisco, Andreas SUMPER, Oriol GOMIS-BELLMUNT a Roberto VILLAFÁFILA-ROBLES. A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2012, **16**(4), 2154–2171. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2012.01.029
- [34] NICHOLS, Rick. Lead-Free Printed Wiring Board Surface Finishes. In: *Lead-free Soldering Process Development and Reliability* [online]. B.m.: John Wiley & Sons, Ltd, 2020 [vid. 2022-03-31], s. 249–305. ISBN 978-1-119-48209-3. Dostupné z: doi:10.1002/9781119482093.ch8
- [35] SCHUELLER, PH.D., Randy. PCB Surface Finish Selection Consideration. In: *Conference: Surface Mount International* [online]. 2010. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/312937958\\_PCB\\_Surface\\_Finish\\_Selection\\_Consideration](https://www.researchgate.net/publication/312937958_PCB_Surface_Finish_Selection_Consideration)
- [36] BELUCZ, Jakub. *Povrchové úpravy desek plošných spojů* [online]. únor 2019 [vid. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:59606/z-aktualniho-vydani-povrchove-upravy-desek-plosnych-spoju>
- [37] Povrchová úprava plošných spojů. *LAMIREL PCB Europe* [online]. [vid. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.lamirel.cz/povrchove-upravy/>
- [38] LAU, John H. a Ning-Cheng LEE. *Assembly and Reliability of Lead-Free Solder Joints*. 1st ed. 2020 edition. Singapore: Springer International Publishing, 2020. ISBN 978-981-15-3920-6.
- [39] CURTIS, D. Basics of Solder Joint Quality. *Joshua Tree Technologies LLC* [online]. 25. červen 2019 [vid. 2022-04-03]. Dostupné z: <http://www.joshuatreetechnologies.com/2/post/2019/06/the-basics-of-solder-joint-quality.html>
- [40] KOBLÍŽEK, Vilém. Měkké pájení v elektronice. *moodle.fel.cvut.cz* [online]. [vid. 2019-10-29]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=3883>
- [41] ANDREEV, K., V. TADAION, Q. ZHU, W. WANG, Y. YIN a T. TONNESEN. Thermal and mechanical cyclic tests and fracture mechanics parameters as indicators of thermal shock resistance – case study on silica refractories. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2019, **39**(4), 1650–1659. ISSN 0955-2219. Dostupné z: doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2018.12.062
- [42] Thermal Shock Testing - Temperature Cycling. *Delserro Engineering Solutions* [online]. 29. leden 2015 [vid. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.desolutions.com/blog/2015/01/thermal-shock-testing-temperature-cycling/>
- [43] *Thermal Shock vs. Thermal Cycling Tests: A Comparison* [online]. [vid. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2022-thermal-shock-vs-thermal-cycling-tests-a-comparison>
- [44] DES. Temperature Cycling Testing: Coffin-Manson Equation. *Delserro Engineering Solutions* [online]. 31. říjen 2014 [vid. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.desolutions.com/blog/2014/10/temperature-cycling-testing-coffin-manson-equation/>
- [45] JESD22-A104-B. *Temperature Cycling*. B.m.: Arlington: JEDEC Solid State Technology Association. srpen 2000

- [46] DUSEK, M. a C. HUNT. Crack Detection Methods For Lead-free Solder Joints [online]. 2004 [vid. 2022-04-17]. ISSN 1473 2734. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Crack-Detection-Methods-For-Lead-free-Solder-Joints-Dusek-Hunt/fec8f3f754751e47268828b4efa56846b002bf59>
- [47] SHARMA, Ashutosh, Young-Joo JANG, Jang Baeg KIM a Jae Pil JUNG. Thermal cycling, shear and insulating characteristics of epoxy embedded Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) solder paste for automotive applications. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2017, **704**, 795–803. ISSN 0925-8388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2017.02.036
- [48] LATASTE, J. -F. 12 - Electrical resistivity for the evaluation of reinforced concrete structures. In: Christiane MAIERHOFER, Hans-Wolf REINHARDT a Gerd DOBMANN, ed. *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures* [online]. B.m.: Woodhead Publishing, 2010 [vid. 2022-04-18], Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, s. 243–275. ISBN 978-1-84569-950-5. Dostupné z: doi:10.1533/9781845699604.2.243
- [49] KOVALOVŠ, Andrejs, Sandris RUČEVSKIS, Vladimir KULAKOV a Andrey ANISKEVICH. Delamination Detection in Carbon Fibre Reinforced Composites Using Electrical Resistance Measurement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2016, **111**, 012010. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/111/1/012010
- [50] SCHUETZE, Andrew P., Wayne LEWIS, Chris BROWN a Wilhelmus J. GEERTS. A laboratory on the four-point probe technique. *American Journal of Physics* [online]. 2004, **72**(2), 149–153. ISSN 0002-9505. Dostupné z: doi:10.1119/1.1629085
- [51] HARADA, Daniel. *Resistivity and Seebeck measurements* [online]. 18. srpen 2012. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/10248912/>
- [52] ELLIOTT, Amicia D. Confocal Microscopy: Principles and Modern Practices. *Current protocols in cytometry* [online]. 2020, **92**(1), e68. ISSN 1934-9297. Dostupné z: doi:10.1002/cpcy.68
- [53] WILSON, T. Confocal Microscopy. In: Bob D. GUENTHER a Duncan G. STEEL, ed. *Encyclopedia of Modern Optics (Second Edition)* [online]. Oxford: Elsevier, 2005 [vid. 2022-04-19], s. 194–202. ISBN 978-0-12-814982-9. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-809283-5.00723-0
- [54] FORD, Brian J., David C JOY a Savile BRADBURY. Scanning electron microscope. *Encyclopedia Britannica* [online]. 30. říjen 2019 [vid. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/scanning-electron-microscope>
- [55] STACHOWIAK, Gwidon W., Andrew W. BATCHELOR a Grazyna B. STACHOWIAK. 6 - Characterization of Test Specimens. In: Gwidon W. STACHOWIAK, Andrew W. BATCHELOR a Grazyna B. STACHOWIAK, ed. *Tribology Series* [online]. B.m.: Elsevier, 2004 [vid. 2022-04-23], Experimental Methods in Tribology, s. 115–150. Dostupné z: doi:10.1016/S0167-8922(04)80022-1
- [56] PEDERGNANA, Antonella, Andreu OLLÉ a Adrian A. EVANS. A new combined approach using confocal and scanning electron microscopy to image surface modifications on quartzite. *Journal of Archaeological Science: Reports* [online]. 2020, **30**, 102237. ISSN 2352-409X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jasrep.2020.102237
- [57] SWAPP, Susan, University of Wyoming. Scanning Electron Microscopy (SEM). *Science Education Resource Center* [online]. [vid. 2022-04-23]. Dostupné z: [https://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/SEM.html](https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html)
- [58] TROXEL, K., A. ALLEN, E.E. BENEDETTO a R. JOSHI. Acceptance Testing Of Low-Ag Reflow Solder Alloys. *Hewlett-Packard Co.* [online]. 2015 [vid. 2022-04-25]. Dostupné z: <http://iconnect007.com/printfn/print.php?cdrID=92057>
- [59] DUŠEK, Karel, David BUŠEK a Petr VESELÝ. *Overview of Selected Issues Related to Soldering* [online]. B.m.: IntechOpen, 2020 [vid. 2021-08-06]. ISBN 978-1-83881-896-8. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.91023

- [60] *SMT Non-Wetting Issue, SMT Assembly Non Wetting / Yun Industrial* [online]. [vid. 2021-08-06]. Dostupné z: <https://yic-assm.com/smt-non-wetting-issue/>
- [61] BIOCCA, Peter. Lead-free SMT Soldering Defects How to Prevent Them. 2004, 7.
- [62] AMIR, D., R. ASPANDIAR, Scott BUTTARS, Wei Wei CHIN a Paramjeet GILL. Head – and – pillow SMT failure modes [online]. 2009 [vid. 2021-08-21]. Dostupné z: doi:Corpus ID: 54022715
- [63] *Head and Pillow SMT Failure Modes* [online]. [vid. 2021-08-21]. Dostupné z: <https://www.circuitinsight.com/programs/50687.html>
- [64] MENK, Alexander a Stéphane P.A. BORDAS. Crack growth calculations in solder joints based on microstructural phenomena with X-FEM. *Computational Materials Science* [online]. 2011, **50**(3), 1145–1156. ISSN 09270256. Dostupné z: doi:10.1016/j.commatsci.2010.11.014
- [65] CHAN, Y.C., C.W. TANG a P.L. TU. Endoscopic inspection of solder joint integrity in chip scale packages. In: [online]. 2000, s. 575. ISBN 978-0-7803-5908-6. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2000.853215
- [66] ROGGEMAN, Brian, Peter BORGESEN, Jing LI, Guarav GODBOLE, Pushkraj TUMNE, K. SRIHARI, Tim LEVO a James PITARRESI. Assessment of PCB pad cratering resistance by joint level testing. In: *Electronic Components and Technology Conference, 2008. ECTC 2008* [online]. 2008, s. 892. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2008.4550081
- [67] IP KEE HUIT a Brian RALPH. A study of the initiation of the tombstoning effect on leadless chips. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 1995, **35**(9), 1251–1268. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/0890-6955(94)00110-6
- [68] ZHONG, Xiankang, Longjun CHEN, Bálint MEDGYES, Zhi ZHANG, Shujun GAO a László JAKAB. Electrochemical migration of Sn and Sn solder alloys: A review. *RSC Adv.* [online]. 2017, **7**, 28186–28206. Dostupné z: doi:10.1039/C7RA04368F
- [69] FLADISCHER, Katrin, Lisa MITTERHUBER, Elke KRAKER, Daniel GINTER, Jordis ROSC a Julien MAGNIEN. A Close Look on Voids in Solder Joints. In: *2018 24rd International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC): 2018 24rd International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)* [online]. Stockholm: IEEE, 2018, s. 1–5 [vid. 2022-04-25]. ISBN 978-1-5386-6759-0. Dostupné z: doi:10.1109/THERMINIC.2018.8593311
- [70] BUŠEK, D., K. DUŠEK, D. RŮŽIČKA, M. PLAČEK, P. MACH, J. URBÁNEK a J. STARÝ. Flux effect on void quantity and size in soldered joints. *Microelectronics Reliability* [online]. 2016, **60**, 135–140. ISSN 00262714. Dostupné z: doi:10.1016/j.microrel.2016.03.009
- [71] MESCHTER, S., P. SNUGOVSKY, Z. BAGHERI, E. KOSIBA, M. ROMANSKY, J. KENNEDY, L. SNUGOVSKY a D. PEROVIC. Whisker Formation on SAC305 Soldered Assemblies. *JOM* [online]. 2014, **66**(11), 2320–2333. ISSN 1047-4838, 1543-1851. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-014-1183-9
- [72] LIU, Xingsheng, Shuangyan XU, Guo-Quan LU a David A DILLARD. Effect of substrate flexibility on solder joint reliability. *Microelectronics Reliability* [online]. 2002, **42**(12), 1883–1891. ISSN 00262714. Dostupné z: doi:10.1016/S0026-2714(02)00269-X
- [73] PANDHER, Ranjit, Ph.D. a Ravi BHATKAL Ph.D. Impact of Substrate Materials On Reliability of High Power LED Assemblies. In: *Proceedings of SMTA International* [online]. 2016. Dostupné z: [https://www.circuitinsight.com/pdf/Impact\\_Substrate\\_Materials\\_Reliability\\_High\\_Power\\_LED\\_Assemblies\\_smta.pdf](https://www.circuitinsight.com/pdf/Impact_Substrate_Materials_Reliability_High_Power_LED_Assemblies_smta.pdf)
- [74] WILD, P., T. GRÖZINGER, D. LORENZ a A. ZIMMERMANN. Void Formation and Their Effect on Reliability of Lead-Free Solder Joints on MID and PCB Substrates. *IEEE Transactions on Reliability* [online]. 2017, **66**(4), 1229–1237. ISSN 1558-1721. Dostupné z: doi:10.1109/TR.2017.2759231

- [75] MENCZEL, Joseph D. a R. Bruce PRIME. *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications*. B.m.: John Wiley & Sons, 2009. ISBN 978-0-471-76917-0.
- [76] FROŠ, Denis, Karel DUŠEK a Petr VESELÝ. Investigation of Impacts on Printed Circuit Board Laminated Composites Caused by Surface Finish Application. *Polymers* [online]. 2021, **13**(19), 3203. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13193203

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Teplotní profil přetavení .....	15
Obr. 2 – Blokové schéma ohřívací a chladicí zóny [8] .....	16
Obr. 3 – Popis postupu při šablonovém tisku [8] .....	20
Obr. 4 – Typy vývodů SMD pouzder [3] .....	22
Obr. 5 – Příklad pouzder typu SO [27, 28] .....	23
Obr. 6 – Příklad pouzder typu FP [27] .....	24
Obr. 7 – Příklad pouzder typu CC [27] .....	24
Obr. 8 – Příklad pouzder typu GA [29] .....	24
Obr. 9 – Příklad pouzder typu CC [29] .....	25
Obr. 10 – Dělení základního materiálu DPS [2] .....	26
Obr. 11 – Vlivy na spolehlivost pájeného spoje [2] .....	31
Obr. 12 – Princip mechanické zkoušky smykem [47] .....	34
Obr. 13 – Principiální a elektrické schéma a) dvoubodové a b) čtyřbodové metody měření odporu [51] .....	35
Obr. 14 – Studený spoj na vývodu typu J [58] .....	36
Obr. 15 – Nesmáčivost SMD součástek [60] .....	37
Obr. 16 – Odsmaččení slitiny SAC [61] .....	37
Obr. 17 – Head-in-pillow defekt [62] .....	37
Obr. 18 – Mechanismus tvorby HiP [62] .....	38
Obr. 19 – Trhlina v a) pájeném spoji [65], b) v laminátu [66] .....	39
Obr. 20 – Efekt náhrobního kamene [59] .....	39
Obr. 21 – Růst dendritu [68] .....	40
Obr. 22 – Typy voidů [70] .....	40
Obr. 23 – Whiskery [71] .....	41
Obr. 24 – Kuličky pájky lokalizovány mimo pájený spoj [59] .....	41
Obr. 25 – Pouzdro typu R .....	43
Obr. 26 – Pouzdro typu MLCC .....	44
Obr. 27 – Pouzdro typu SOIC .....	44
Obr. 28 – Pouzdro typu PLCC .....	44
Obr. 29 – Pouzdro typu VSON .....	44
Obr. 30 – Zhotovený návrh DPS .....	45
Obr. 31 – Zkoumané osazené DPS: a) FR4 (OSP), b) FR4 (HAL), c) PI, d) AL .....	47
Obr. 32 – Výbrusy pro variantu 2000 cyklů: a) vodivý výbrus, b) nevodivé výbrusy .....	48
Obr. 33 – Vnitřek šokové komory se zkoumanými DPS .....	49
Obr. 34 – Příklad převodu snímku z SEM do černobílé bitmapové formy (varianta FR4_OSP_1500) .....	50
Obrázek 35 – a) Konfokální mikroskop, b) Elektronový mikroskop .....	50
Obr. 36 – Trhací zařízení .....	51
Obr. 37 – Detail uchycení vzorku během měření na trhačce .....	51
Obr. 38 – Typická expanzní křivka při TMA [75] .....	52
Obr. 39 – TMA Q400 a) celé zařízení, b) detail zařízení .....	53
Obr. 40 – Porušení vodivých cest na PI deskách .....	54
Obr. 41 – Pájený spoj na typu součástky R, AL substrát: a) bez šoku b) 2000 cyklů .....	58
Obr. 42 – Pájený spoj na typu součástky MLCC, AL substrát: a) bez šoku, b) 2000 cyklů .....	59
Obr. 43 – Pájený spoj na typu součástky VSON, 2000 cyklů: a) PI, b) AL .....	59
Obr. 44 – Pájený spoj na typu součástky SOIC, FR4_HAL substrát, 2000 cyklů: a) celý spoj, b) mikrotrhlina .....	60

Obr. 45 – Pájený spoj na typu součástky PLCC, FR4\_OSP substrát, 2000 cyklů: a) celý spoj, b) mikrotrhlina ..... 60

## Seznam tabulek

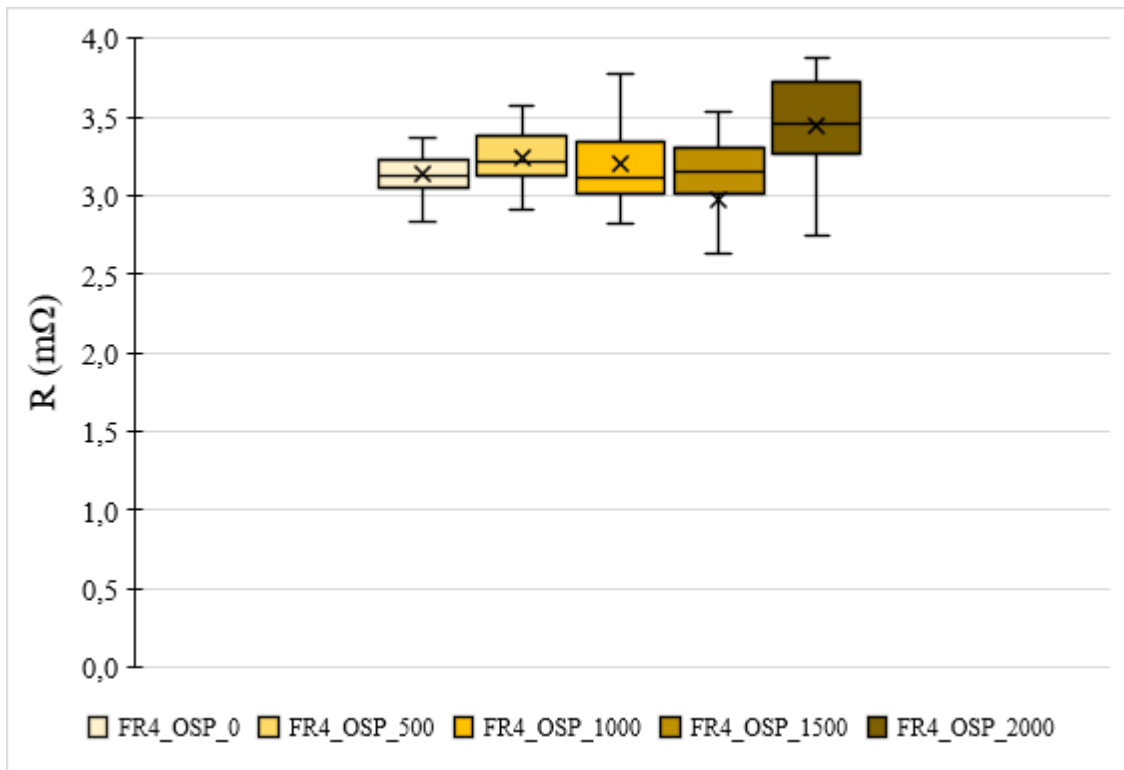
Tab. 1 – Testovací podmínky JESD22-A104-B [45].....	33
Tab. 2 – Průměrné hodnoty el. odporu pájených spojů rezistorových součástek .....	58
Tab. 3 – Průměrné hodnoty šířky IMC vrstvy pájených spojů rezistorových součástek .....	62
Tab. 4 – Průměrné hodnoty max. sil pájených spojů rezistorových součástek .....	62
Tab. 5 – Průměrné hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti substrátů DPS.....	66
Tab. 6 – Průměrné hodnoty teplot skelného přechodu FR4 substrátů.....	66

## Seznam grafů

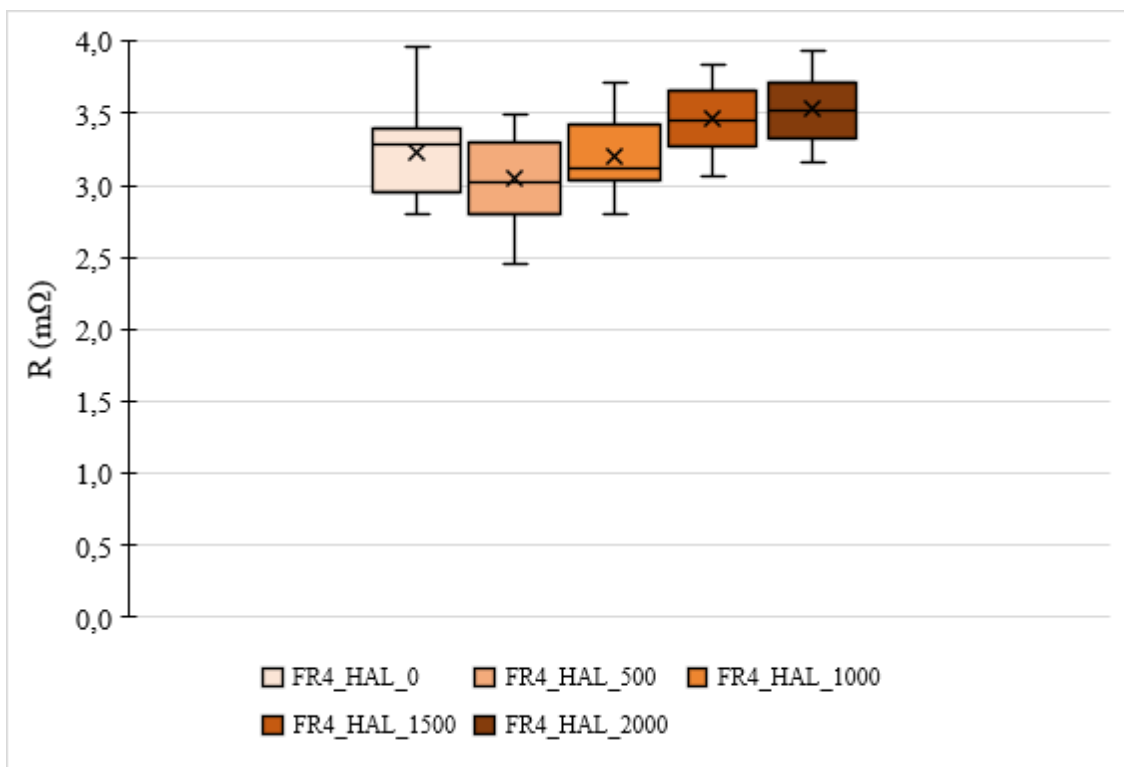
Graf 1 – Nastavený teplotní profil přepájení.....	46
Graf 2 – Ukázka záznamu nárůstu el. odporu (320-440 cyklů) .....	55
Graf 3 – Ukázka záznamu nárůstu el. odporu – podrobněji (420-440 cyklů) .....	55
Graf 4 – Ukázka záznamu konečného průběhu el. odporu (1680-1700 cyklů).....	56
Graf 5 – Průměrné hodnoty el. odporu pájených spojů rezistorových součástek .....	57
Graf 6 – Průměrné hodnoty šířky IMC vrstvy pájených spojů rezistorových součástek .....	61
Graf 7 – Průměrné hodnoty max. sil pájených spojů rezistorových součástek .....	63
Graf 8 – Expanzní křivky TMA analýzy (0 a 2000 cyklů) .....	64
Graf 9 – Průměrné hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti substrátů DPS .....	65
Graf 10 – Průměrné hodnoty teplot skelného přechodu FR4 substrátů .....	67

# Přílohy

## Příloha A

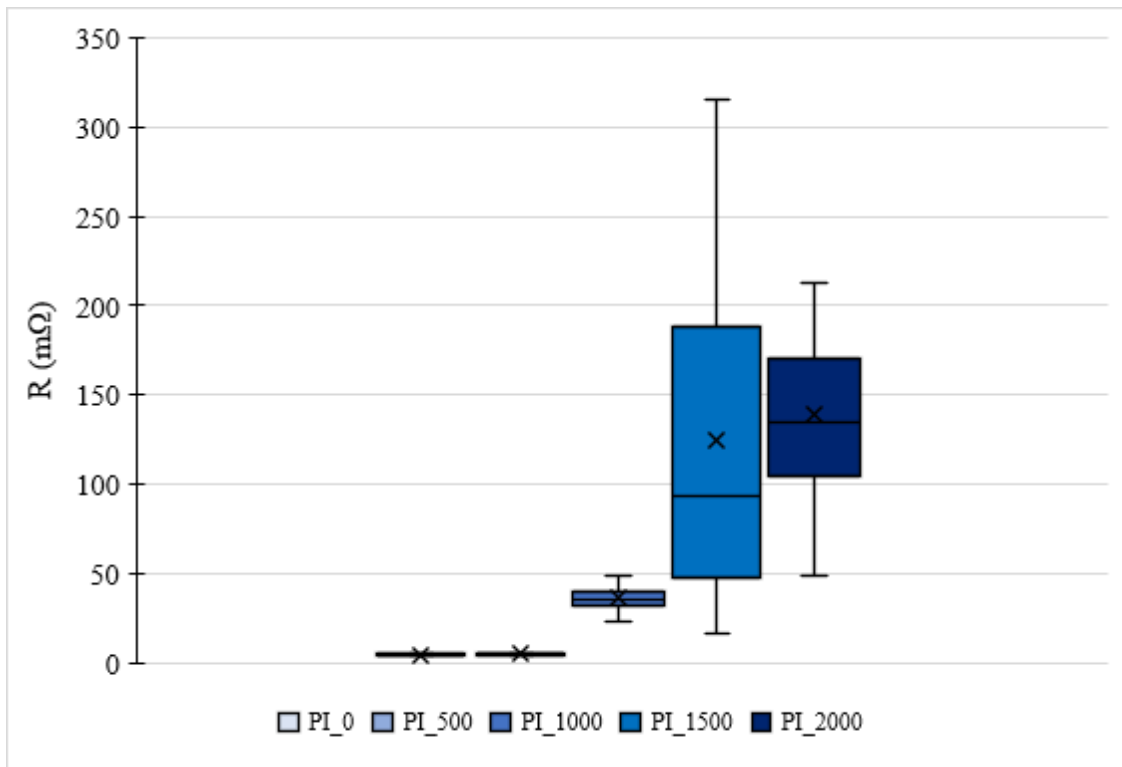


Graf A.1 – Změřené hodnoty el. odporu FR4\_OSP

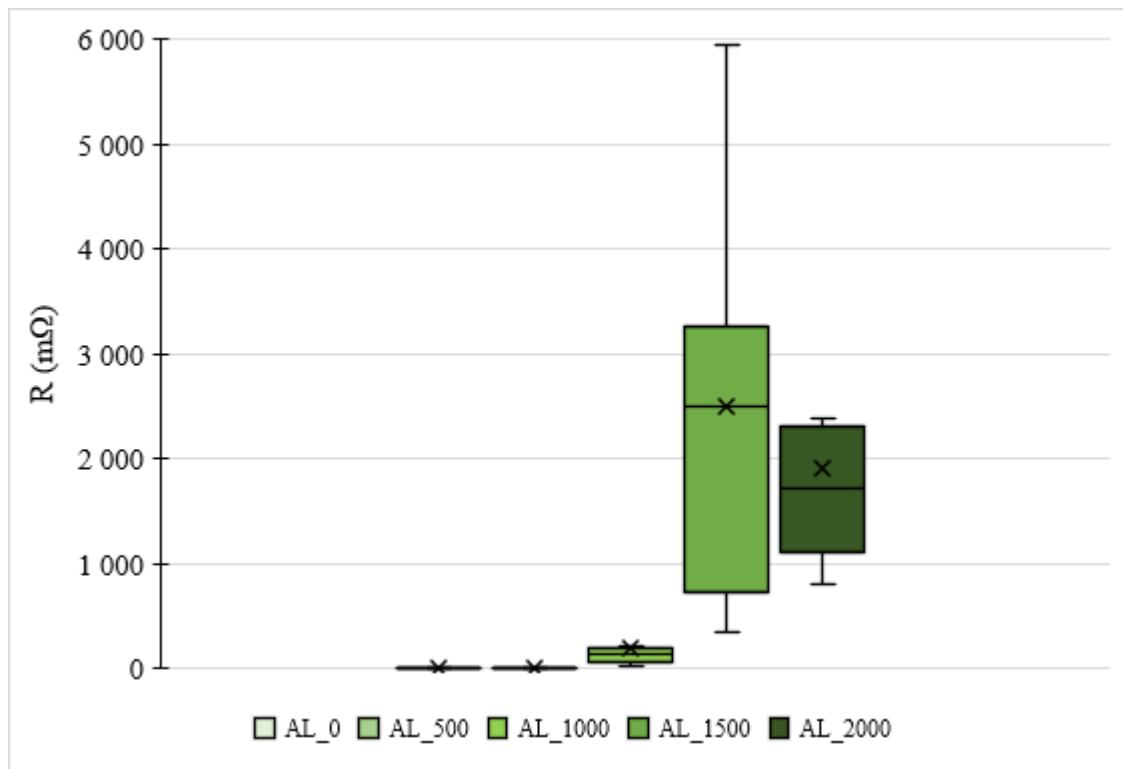


Graf A.2 – Změřené hodnoty el. odporu FR4\_HAL



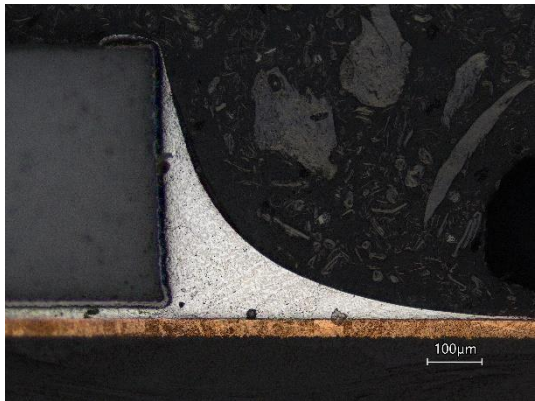


Graf A.3 – Změřené hodnoty el. odporu PI

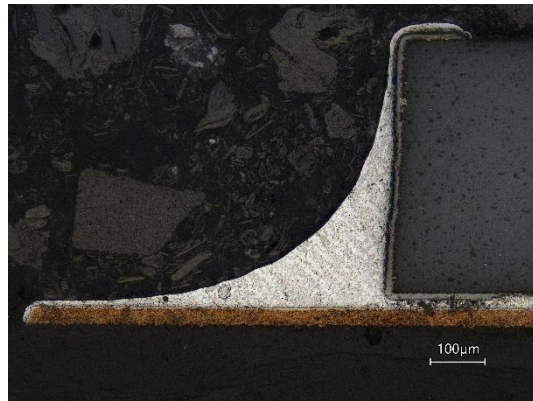


Graf A.4 – Změřené hodnoty el. odporu AL

## Příloha B



a)



b)



c)



d)

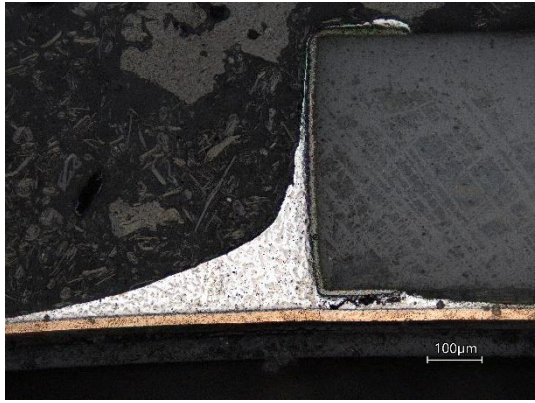
Obr. B.1 – Pájené spoje na typu součástky R, bez šoku: a) FR4\_OSP, b) FR4\_HAL, c) PI, d) AL



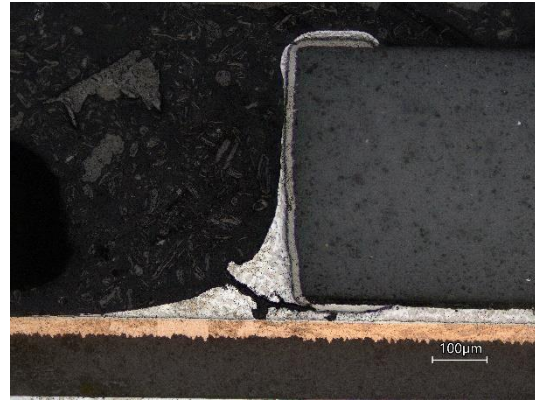
a)



b)



c)



d)

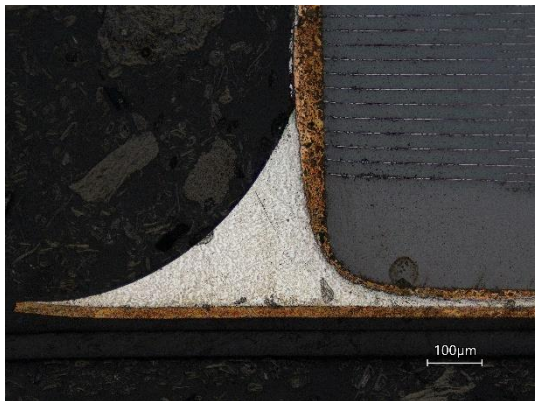
Obr. B.2 – Pájené spoje na typu součástky R, 2000 cyklů: a) FR4\_OSP, b) FR4\_HAL, c) PI, d) AL



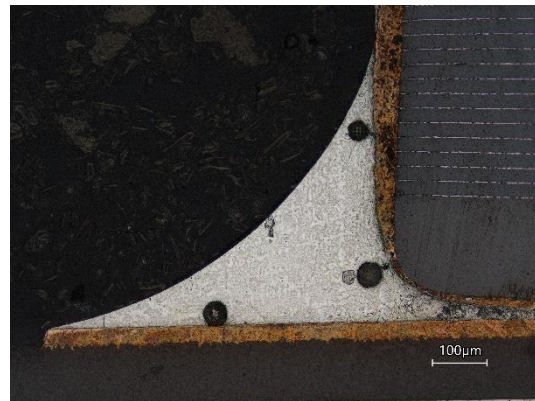
a)



b)



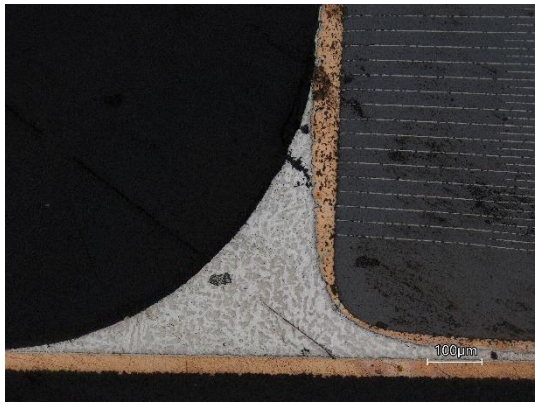
c)



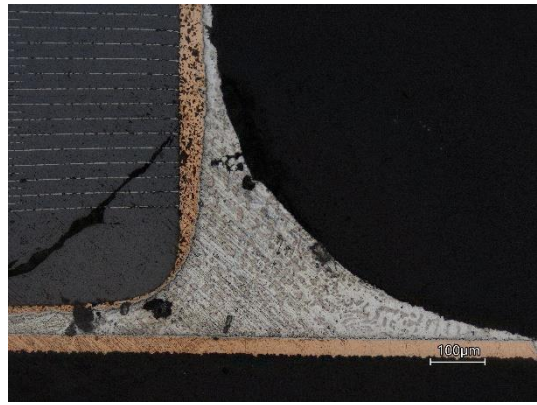
d)

Obr. B.3 – Pájené spoje na typu součástky MLCC, bez šoku: a) FR4\_OSP, b) FR4\_HAL, c) PI, d) AL

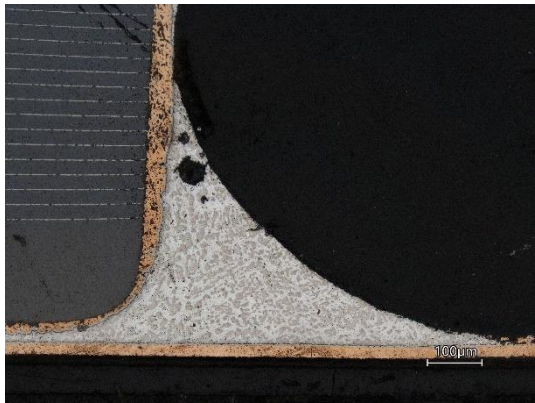




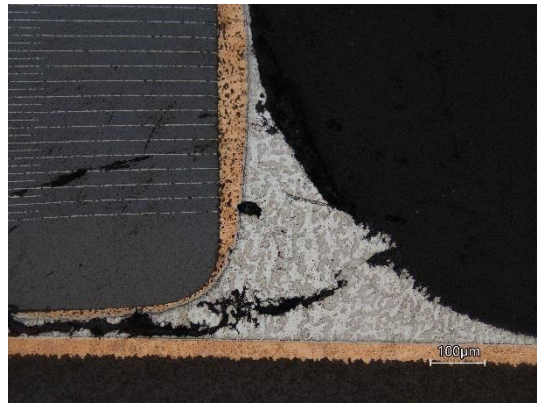
a)



b)

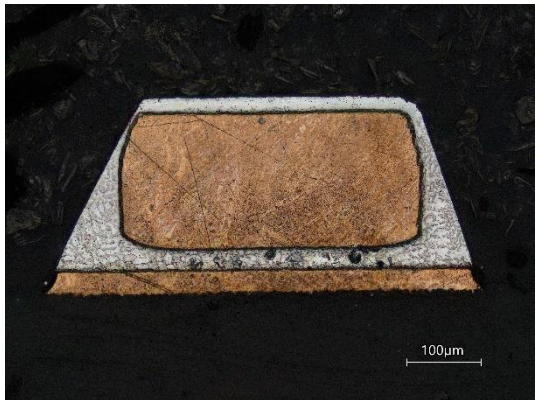


c)

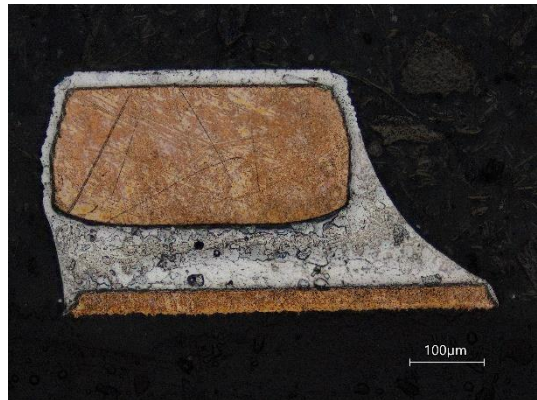


d)

Obr. B.4 – Pájené spoje na typu součástky MLCC, 2000 cyklů: a) FR4\_OSP, b) FR4\_HAL, c) PI, d) AL



a)



b)

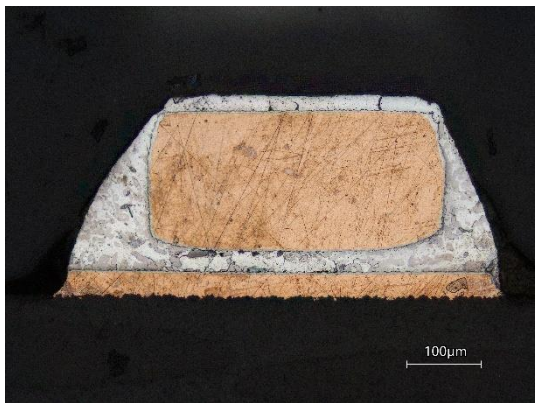


c)



d)

Obr. B.5 – Pájené spoje na typu součástky SOIC, bez šoku: a) FR4\_OSP, b) FR4\_HAL, c) PI, d) AL



a)



b)



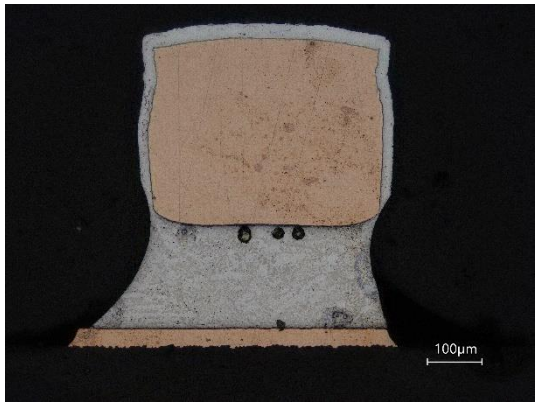
c)



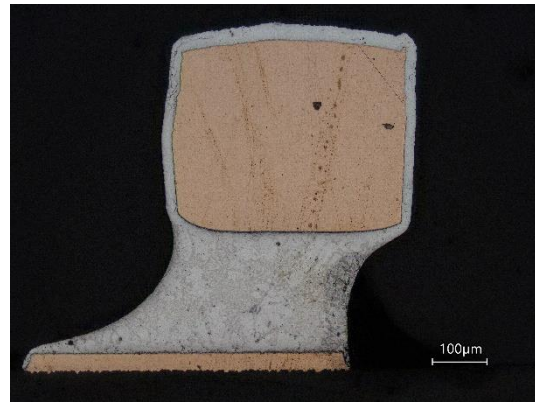
d)

Obr. B.6 – Pájené spoje na typu součástky SOIC, 2000 cyklů: a) FR4\_OSP, b) FR4\_HAL, c) PI, d) AL

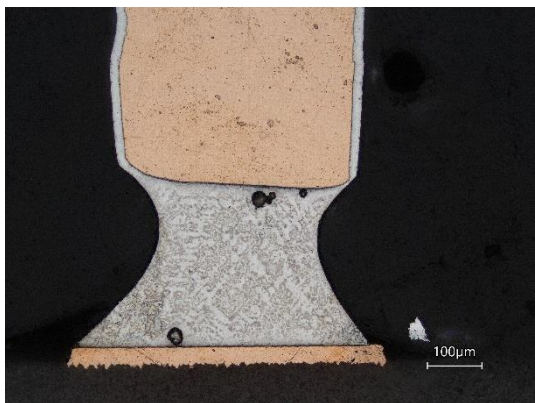




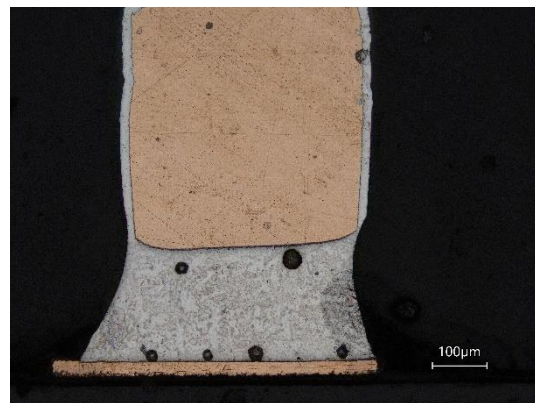
a)



b)

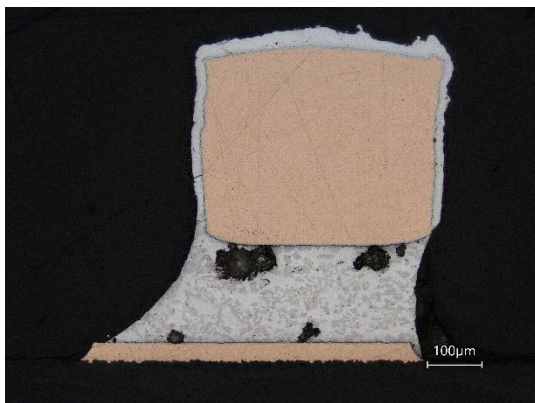


c)

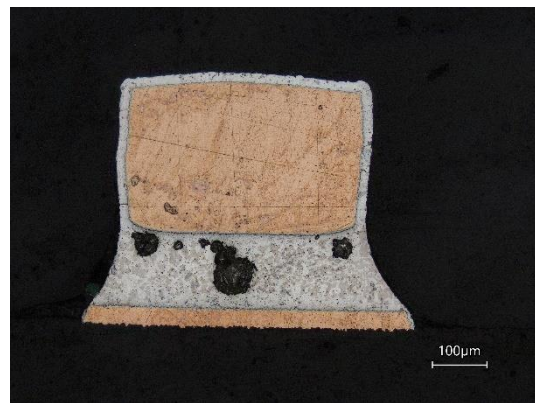


d)

Obr. B.7 – Pájené spoje na typu součástky PLCC, bez šoku: a) FR4\_OSP, b) FR4\_HAL, c) PI, d) AL



a)



b)

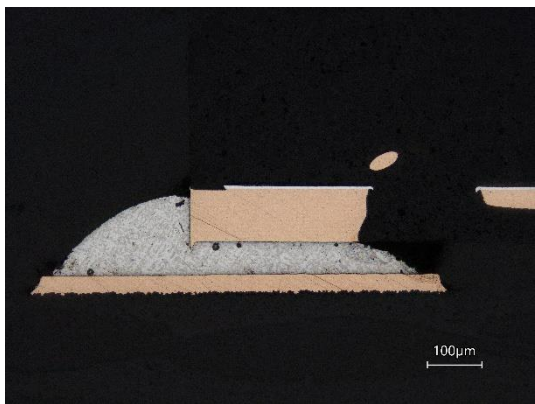


c)

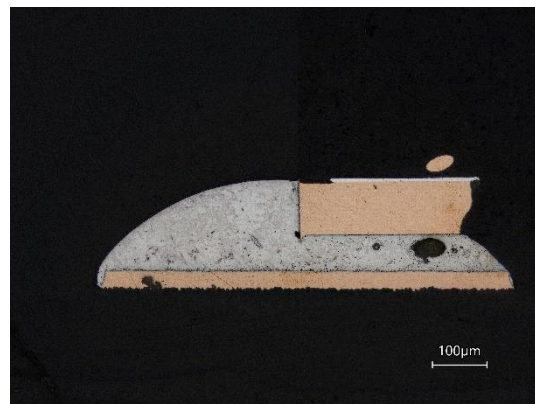


d)

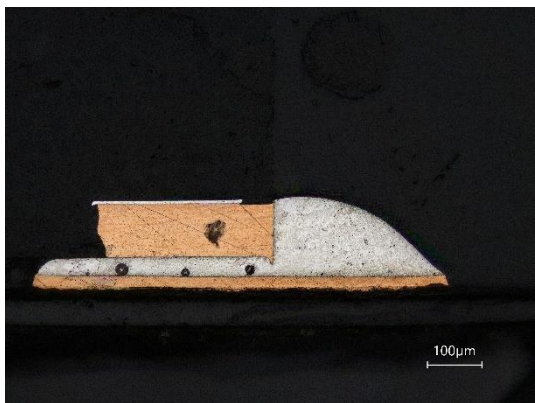
Obr. B.8 – Pájené spoje na typu součástky PLCC, 2000 cyklů: a) FR4\_OSP, b) FR4\_HAL, c) PI, d) AL



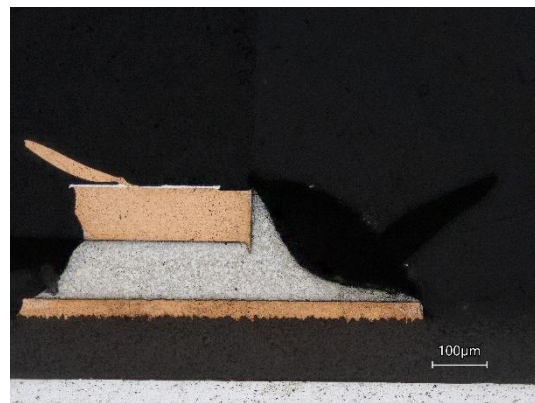
a)



b)



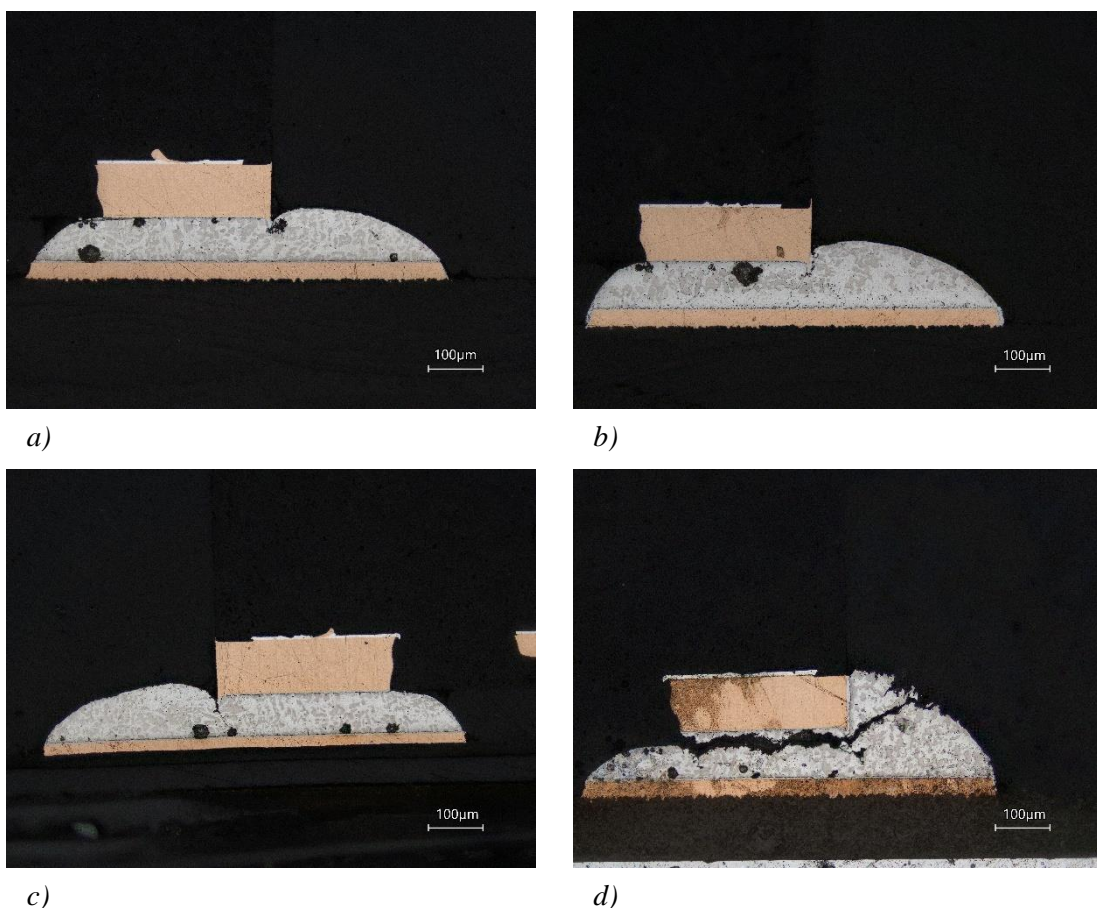
c)



d)

Obr. B.9 – Pájené spoje na typu součástky VSON, bez šoku: a) FR4\_OSP, b) FR4\_HAL, c) PI, d) AL





Obr. B.10 – Pájené spoje na typu součástky VSON, 2000 cyklů: a) FR4\_OSP, b) FR4\_HAL, c) PI, d) AL

## Příloha C

běh	0 CYKLŮ	KOEFIČIENT TEPLOTNÍ ROZTAŽNOSTI $\alpha(\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$							
		úsek ( $^{\circ}\text{C}$ )	FR4 (OSP)	úsek ( $^{\circ}\text{C}$ )	FR4 (HAL)	úsek ( $^{\circ}\text{C}$ )	PI	úsek ( $^{\circ}\text{C}$ )	AL
1	oteplovací větev	60 - 100	45,2	40 - 60	41,3	80 - 100	59,8	60 - 100	26,2
		130 - 180	242,2	130 - 180	237,5				
	chladicí větev	100 - 60	41,4	100 - 40	62,0	100 - 60	205,3	100 - 60	28,3
		180 - 130	255,1	180 - 130	280,5				
2	oteplovací větev	60 - 100	46,8	40 - 60	46,1	80 - 100	226,4	60 - 100	25,5
		130 - 180	243,8	130 - 180	263,4				
	chladicí větev	100 - 60	42,3	100 - 40	66,2	100 - 60	220,3	100 - 60	29,8
		180 - 130	239,8	180 - 130	272,0				

Tab. C.1 – Naměřené průměrné hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti, bez šoku

běh	500 CYKLŮ	KOEFIČIENT TEPLOTNÍ ROZTAŽNOSTI $\alpha(\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$							
		úsek ( $^{\circ}\text{C}$ )	FR4 (OSP)	úsek ( $^{\circ}\text{C}$ )	FR4 (HAL)	úsek ( $^{\circ}\text{C}$ )	PI	úsek ( $^{\circ}\text{C}$ )	AL
1	oteplovací větev	60 - 100	47,4	40 - 60	23,6	80 - 100	177,0	60 - 100	25,5
		130 - 180	201,5	130 - 180	221,2				
	chladicí větev	100 - 60	50,4	100 - 40	67,7	100 - 60	208,5	100 - 60	22,0
		180 - 130	255,1	180 - 130	272,4				
2	oteplovací větev	60 - 100	51,5	40 - 60	40,7	80 - 100	117,5	60 - 100	27,4
		130 - 180	204,2	130 - 180	256,2				
	chladicí větev	100 - 60	52,6	100 - 40	63,2	100 - 60	167,6	100 - 60	27,8
		180 - 130	256,9	180 - 130	269,5				

Tab. C.2 – Naměřené průměrné hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti, 500 cyklů



běh	1000 CYKLŮ	KOEFICIENT TEPLOTNÍ ROZTAŽNOSTI $\alpha(\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C})$							
		úsek ( $^\circ\text{C}$ )	FR4 (OSP)	úsek ( $^\circ\text{C}$ )	FR4 (HAL)	úsek ( $^\circ\text{C}$ )	PI	úsek ( $^\circ\text{C}$ )	AL
1	oteplovací větev	60 - 100	41,5	40 - 60	38,4	80 - 100	155,4	60 - 100	21,8
		130 - 180	243,6	130 - 180	229,2				
	chladicí větev	100 - 60	54,5	100 - 40	72,3	100 - 60	177,3	100 - 60	20,8
		180 - 130	257,4	180 - 130	279,2				
2	oteplovací větev	60 - 100	55,4	40 - 60	46,3	80 - 100	89,4	60 - 100	19,2
		130 - 180	229,3	130 - 180	267,1				
	chladicí větev	100 - 60	54,1	100 - 40	71,2	100 - 60	169,0	100 - 60	22,6
		180 - 130	267,5	180 - 130	276,8				

Tab. C.3 – Naměřené průměrné hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti, 1000 cyklů

běh	1500 CYKLŮ	KOEFICIENT TEPLOTNÍ ROZTAŽNOSTI $\alpha(\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C})$							
		úsek ( $^\circ\text{C}$ )	FR4 (OSP)	úsek ( $^\circ\text{C}$ )	FR4 (HAL)	úsek ( $^\circ\text{C}$ )	PI	úsek ( $^\circ\text{C}$ )	AL
1	oteplovací větev	60 - 100	44,5	40 - 60	51,2	80 - 100	90,4	60 - 100	19,4
		130 - 180	237,6	130 - 180	278,9				
	chladicí větev	100 - 60	55,5	100 - 40	64,1	100 - 60	141,6	100 - 60	26,1
		180 - 130	262,3	180 - 130	281,3				
2	oteplovací větev	60 - 100	52,9	40 - 60	47,4	80 - 100	140,0	60 - 100	21,4
		130 - 180	237,9	130 - 180	272,4				
	chladicí větev	100 - 60	54,8	100 - 40	64,2	100 - 60	200,2	100 - 60	27,8
		180 - 130	250,8	180 - 130	278,4				

Tab. C.4 – Naměřené průměrné hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti, 1500 cyklů

běh	2000 CYKLŮ	KOEFICIENT TEPLOTNÍ ROZTAŽNOSTI $\alpha(\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C})$							
		úsek ( $^\circ\text{C}$ )	FR4 (OSP)	úsek ( $^\circ\text{C}$ )	FR4 (HAL)	úsek ( $^\circ\text{C}$ )	PI	úsek ( $^\circ\text{C}$ )	AL
1	oteplovací větev	60 - 100	29,5	40 - 60	36,1	80 - 100	107,7	60 - 100	22,7
		130 - 180	128,5	130 - 180	230,7				
	chladicí větev	100 - 60	53,0	100 - 40	58,6	100 - 60	214,9	100 - 60	23,3
		180 - 130	260,7	180 - 130	271,6				
2	oteplovací větev	60 - 100	51,3	40 - 60	45,9	80 - 100	182,0	60 - 100	24,0
		130 - 180	228,2	130 - 180	259,1				
	chladicí větev	100 - 60	52,1	100 - 40	59,1	100 - 60	232,5	100 - 60	28,8
		180 - 130	260,5	180 - 130	272,0				

Tab. C.5 – Naměřené průměrné hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti, 2000 cyklů

## Příloha D

běh	0 CYKLŮ	TEPLOTA SKELNÉHO PŘECHODU $\tau(^\circ\text{C})$			
		FR4 (OSP)	FR4 (HAL)	PI	AL
1	oteplovací větev	121,1	121,3	-	-
	chladicí větev	129,9	123,5	-	-
2	oteplovací větev	128,3	124,4	-	-
	chladicí větev	132,1	124,1	-	-

Tab. D.1 – Naměřené průměrné hodnoty teplot skelného přechodu, bez šoku

běh	500 CYKLŮ	TEPLOTA SKELNÉHO PŘECHODU $\tau(^\circ\text{C})$			
		FR4 (OSP)	FR4 (HAL)	PI	AL
1	oteplovací větev	134,4	134,6	-	-
	chladicí větev	129,2	130,3	-	-
2	oteplovací větev	132,6	131,4	-	-
	chladicí větev	131,8	125,3	-	-

Tab. D.2 – Naměřené průměrné hodnoty teplot skelného přechodu, 500 cyklů

běh	1000 CYKLŮ	TEPLOTA SKELNÉHO PŘECHODU $\tau$ (°C)			
		FR4 (OSP)	FR4 (HAL)	PI	AL
1	oteplovací větev	134,1	133,4	-	-
	chladicí větev	128,0	132,9	-	-
2	oteplovací větev	128,5	129,4	-	-
	chladicí větev	128,9	124,0	-	-

Tab. D.3 – Naměřené průměrné hodnoty teplot skelného přechodu, 1000 cyklů

běh	1500 CYKLŮ	TEPLOTA SKELNÉHO PŘECHODU $\tau$ (°C)			
		FR4 (OSP)	FR4 (HAL)	PI	AL
1	oteplovací větev	133,4	132,8	-	-
	chladicí větev	130,7	122,7	-	-
2	oteplovací větev	135,3	127,5	-	-
	chladicí větev	134,1	124,0	-	-

Tab. D.4 – Naměřené průměrné hodnoty teplot skelného přechodu, 1500 cyklů

běh	2000 CYKLŮ	TEPLOTA SKELNÉHO PŘECHODU $\tau$ (°C)			
		FR4 (OSP)	FR4 (HAL)	PI	AL
1	oteplovací větev	133,4	132,7	-	-
	chladicí větev	129,1	129,1	-	-
2	oteplovací větev	128,6	128,8	-	-
	chladicí větev	125,9	124,1	-	-

Tab. D.5 – Naměřené průměrné hodnoty teplot skelného přechodu, 2000 cyklů