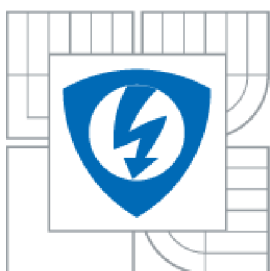




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

# PEVNOST PÁJENÝCH SPOJŮ NA KERAMICKÝCH SUBSTRÁTECH

THE STRENGTH OF SOLDERED JOINTS ON CERAMIC SUBSTRATES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

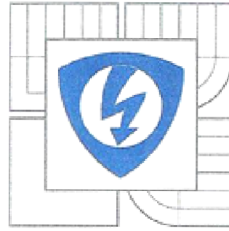
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

VOJTĚCH JANSA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. MARTIN ADÁMEK, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Mikroelektronika a technologie

**Student:** Vojtěch Jansa  
**Ročník:** 3

**ID:** 125149  
**Akademický rok:** 2012/2013

## NÁZEV TÉMATU:

**Pevnost pájených spojů na keramických substrátech**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s technologií bezolovnatého pájení a testováním mechanických vlastností pájených spojů. Navrhněte testovací motiv na keramický substrát pro testování pevnosti pájených spojů na zařízení Dage pomocí testu stříhem. Pomocí navrženého testovacího motivu vytvořte a otestujte olovnaté a bezolovnaté pájené spoje pro různou koncentraci kyslíku v ochranné atmosféře. Typ pájecích past zadá vedoucí práce. Zjištěné vlastnosti past porovnejte.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 11.2.2013

**Termín odevzdání:** 6.6.2013

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Adámek, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá problematikou bezolovnatého pájení a následným testováním mechanických vlastností vytvořeného spoje. V teoretické části práce jsou rozebrány druhy bezolovnatých pájek, vliv ochranné atmosféry na vlastnosti pájky a mechanické zkoušky pájených spojů. Dále jsou zmíněny typy základních materiálů a technologie výroby tlustých vrstev. V praktické části byl navržen obrazec, který byl využit pro testování mechanické pevnosti pájených spojů mezi SMD součástkou a keramickým substrátem. Vlastnosti bezolovnaté pasty byly zkoumány při různých koncentracích O<sub>2</sub> a porovnány s vlastnostmi olovnaté pasty.

## **Klíčová slova**

Bezolovnatá pájka, ochranná atmosféra, dusík, pájení přetavením, kvalita pájeného spoje, test stříhem.

## **Abstract:**

This thesis deals with problematic of lead – free soldering and consequent testing of mechanical characteristics of solder joints. The theoretical part is focused on various types of lead – free solders, influence of protective atmosphere on the solders characteristics and mechanical testing of solder joints. Basic materials and thick - films making technology is mentioned. Practical part contains a design of topology that was used for mechanical strength testing of solder joints connecting SMD component and ceramic substrate. Properties of lead – free solder pastes was investigated on various concentrations of O<sub>2</sub> and compared with lead soldering paste.

## **Key words**

Lead - free solder, protective atmosphere, nitrogen, reflow soldering, quality of solder joint, shear test.

**Bibliografická citace:**

JANSA, V. *Pevnost pájených spojů na keramických substrátech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Adámek, Ph.D..



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma **Pevnost pájených spojů na keramických substrátech** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne .....

.....  
Vojtěch Jansa

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce ing. Martinu Adámkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 4.6.2013

## Obsah

<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>1 Bezolovnaté pájení</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Bezolovnaté pájky</b>	<b>11</b>
1.1.1 Vliv jednotlivých příměsí na vlastnosti pájky	11
1.1.2 Pájka SAC (Sn/Ag/Cu)	12
1.1.3 Pájka Sn/Cu	13
1.1.4 Pájka Sn/Ag	13
1.1.5 Pájka Sn/Bi	13
1.1.6 Pájka Sn/In	13
1.1.7 Pájka Sn/Sb	13
<b>1.2 Tavidla</b>	<b>14</b>
<b>1.3 Způsoby pájení</b>	<b>15</b>
1.3.1 Pájení vlnou	15
1.3.2 Pájení přetavením (reflow soldering)	16
1.3.3 Pájení v parách	18
1.3.4 Pájení horkým nástrojem	19
1.3.5 Pájení laserem	19
<b>1.4 Vliv ochranné atmosféry</b>	<b>19</b>
1.4.1 Dusíková ochranná atmosféra	19
<b>2 Pasty a jejich využití v elektrotechnice</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Pasty pro tlustovrstvou technologii</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Pájecí pasty</b>	<b>22</b>
<b>3 Základní materiál substrátu</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Organické základní materiály</b>	<b>24</b>
3.1.1 Základní neohebné organické materiály:	24
3.1.2 Základní ohebné organické materiály	25
<b>3.2 Anorganické základní materiály</b>	<b>25</b>
<b>4 Spolehlivost pájeného spoje</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Stárnutí pájeného spoje</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Mechanické namáhání</b>	<b>28</b>
<b>4.3 Tepelné namáhání</b>	<b>28</b>
<b>5 Mechanické testování pájených spojů</b>	<b>29</b>
<b>5.1 Zkouška stříhem</b>	<b>29</b>
<b>6 Praktická část</b>	<b>31</b>
<b>6.1 Návrh a výroba testovacích substrátů</b>	<b>31</b>
<b>6.2 Popis experimentálních zařízení</b>	<b>34</b>
<b>6.3 Vizuální posouzení pájených spojů</b>	<b>36</b>
<b>6.4 Naměřené hodnoty pevnosti spojů</b>	<b>38</b>
6.4.1 Součástky velikosti 2512	38
6.4.2 Součástky velikosti 1206	40
6.4.3 Součástky velikosti 0805	41
6.4.4 Shrnutí výsledků	42

<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>44</b>
	<b>Literatura</b>	<b>45</b>
	<b>Seznam použitých zkratk</b>	<b>47</b>
	<b>Příloha 1: Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů</b>	<b>48</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1: Porovnání různých typů tavidel [3]. .....	15
Obr. 2: Porovnání teplotního profilu a) standardní pájecí pasty b) no-clean pájecí pasty [3]. .....	17
Obr. 3: Srovnání dusíkové atmosféry se vzduchem [3]. .....	20
Obr. 4: Podélný teplotní profil pro výpal tlustých vrstev [11]. .....	22
Obr. 5: Rozdělení základních materiálů [3]. .....	23
Obr. 6: Znázornění vlivu stárnutí a namáhání v intermetalické vrstvě Cu6Sn5 [1]: .....	27
Obr. 7: Znázornění faktorů ovlivňujících životnost pájených spojů[1]. .....	28
Obr. 8: Nastavení výšky stříhové hlavy dle [16][17]. .....	29
Obr. 9: Zarovnání stříhové hlavy dle [16][17]. .....	30
Obr. 10: Návrh motivu testovací destičky s rozmístěním součástek. ....	31
Obr. 11: Návrh motivu vodivé pasty. ....	31
Obr. 12: Návrh motivu pájecí pasty. ....	31
Obr. 13: Osazený substrát. ....	32
Obr. 14: Přetavovací profil pro pastu R256 [20]. ....	33
Obr. 15: Na exsikátoru naměřený teplotní profil pro pastu R256. ....	33
Obr. 16: Laboratorní apertura - exsikátor a detail topné desky. ....	34
Obr. 17: Schéma laboratorní aparatury s dusíkovou atmosférou – exsikátor. ....	35
Obr. 18: Zařízení DAGE PC2400. ....	36
Obr. 19: Zapájená součástka 1206 pastou NXG1 - HF na vzduchu. ....	36
Obr. 20: Zapájená součástka 1206 pastou NXG1 - HF při O <sub>2</sub> = 1000ppm. ....	36
Obr. 21: Zapájená součástka 1206 pastou R256 na vzduchu. ....	37
Obr. 22: Zapájená součástka 1206 pastou R256 při O <sub>2</sub> = 200ppm .....	37
Obr. 23: Substrát zapájený pastou R256 při O <sub>2</sub> = 20ppm. ....	37
Obr. 24: Substrát zapájený pastou NXG1 - HF při O <sub>2</sub> = 20ppm. ....	37
Obr. 25: Příklady způsobů odtrhnutí součástky. ....	38
Obr. 26: Výbrus pájeného spoje: pájka NXG1-HF , vzduch. ....	38
Obr. 27: Výbrus pájeného spoje: pájka NXG1-HF , O <sub>2</sub> = 2000ppm. ....	38
Obr. 28: Graf naměřených pevností pájených spojů pro součástky 2512. ....	39
Obr. 29: Graf naměřených pevností pájených spojů pro součástky 1206. ....	40
Obr. 30: Graf naměřených pevností pájených spojů pro součástky 0805. ....	41
Obr. 31: Graf všech naměřených pevností pájených spojů. ....	42

## Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled teplot tavení a použití používaných bezolovnatých pájek [4]. .....	11
Tab. 2: Členění tavidel dle ČSN EN ISO 9454-1[3].....	14
Tab. 3: Členění tavidel dle ANSI J-STD-004 [3].....	14
Tab 4: Vlastnosti nepoužívanějších organických materiálů [3]. .....	25
Tab 5: Vlastnosti vybraných anorganických ZM [3]. .....	26
Tab 6: Parametry natisknutého motivu. ....	32
Tab 7: Použité pájecí pasty.....	32
Tab 8: Pevnost pájených spojů součástky o velikosti 2512. ....	39
Tab 9: Pevnost pájených spojů součástky o velikosti 1206. ....	40
Tab 10: Pevnost pájených spojů součástky o velikosti 0805. ....	41
Tab 11: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 200 000ppm. .	48
Tab 12: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 5000ppm. ....	49
Tab 13: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 2000ppm. ....	50
Tab 14: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 1000ppm. ....	51
Tab 15: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 500ppm. ....	52
Tab 16: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 200ppm. ....	53
Tab 17: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 100ppm. ....	54
Tab 18: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 50ppm. ....	55
Tab 19: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 20ppm. ....	56
Tab 20: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 10ppm. ....	57

# Úvod

Pájení je metalurgický proces, při němž dochází k spojování dvou kovů snadno tavitelnou slitinou. Jako hlavní složka slitin se používá cín doplněný o další složky značným způsobem ovlivňující vlastnosti této slitiny. Nejvíce se rozšířila eutektická slitina cínu a olova ( 63%Sn, 37%Pb ). Používaly se ale i slitiny s jiným poměrem cínu a olova, kde se množství olova v pájce pohybovalo od 36% do 90%. Mezi hlavní výhody těchto pájek patří nízká cena, nízká teplota tavení a dobré mechanické vlastnosti [1].

S postupujícím ekologickým citěním dorazila snaha nepoužívat toxické látky i do elektrotechniky. Výsledkem byla norma vydaná Evropskou unií, která zakazuje používání vybraných nebezpečných látek k 1. 7. 2006. Nejznámější z těchto vybraných látek jsou olovo, rtuť a šestimocný chrom [2]. Proto museli výrobci nalézt kvalitativně rovnocennou náhradu za olovnaté pájky. Nové slitiny jsou stále založeny na cínu s dalšími příměsemi. Vyznačují se vynikající pevností a tažností, ale bohužel mají vyšší tendenci k oxidaci a vyznačují se horší smáčivostí a vyšší agresivitou. Potřebují také vyšší teploty k přetavení. Uvedené vlastnosti kladou vyšší nároky na pájecí zařízení, která musí pracovat v užším pracovním okně v případě pájení přetavením a také vyšší přesnost regulace teploty v případě pájení vlnou. Problémy s vyšší oxidací a horší smáčivostí bezolovnatých pájek lze vyřešit pájením v ochranné dusíkaté atmosféře. Dusíkatá atmosféra také redukuje množství použitého tavidla.

Problém bezolovnatých pájek je nedostatečně dlouhá doba používání, aby byly známé relevantní poznatky o dlouhodobé spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů. Proto byla udělena výjimka ze zákazu používání olovnatých pájek pro aplikace, kde je vyžadována nejvyšší možná spolehlivost, jako je letectví, vojenský průmysl a lékařství.

Tato bakalářská práce se zabývá teorií bezolovnatého pájení, použitím ochranné atmosféry, teorií pájení přetavením a návrhem zkušebního obrazce na keramický substrát pro následné mechanické zkoušky pevnosti pájeného spoje. Zkušební obrazec byl navržen pro zkoušku pájeného spoje stříhem na zařízení DAGE PC2400.

# 1 Bezolovnaté pájení

## 1.1 Bezolovnaté pájky

Hlavním problémem přechodu na bezolovnaté pájky je vyšší cena a vyšší teploty tavení bezolovnatých pájek. Zatímco pájky Sn/Pb dosahují tekutého stavu při teplotě 183°C, u převážné většiny bezolovnatých pájek je tento stav dosažitelný v rozmezí teplot 195 - 227°C, v závislosti na jejich složení. Příklady teplot tavení vybraných pájek jsou uvedeny v tab. 1 [3][4].

Tab. 1: Přehled teplot tavení a využití používaných bezolovnatých pájek [4].

Teplota tavení (°C)	Pájka	Využití v průmyslu
227	Sn/Cu	spotřebitelský, telekomunikace
221	Sn/Ag	
217	Sn/Ag/Cu/Sb	
	Sn/In/Ag	
	Sn/Ag/Cu/Zn	
	Sn/Ag/Cu	automobilový, telekomunikace
	Sn/Ag/Bi/Cu	vojenský, letecký
	Sn/Ag/Bi/Cu/Ge	spotřebitelský
206-213	Sn/Ag/Bi/X	spotřebitelský
	Sn/Ag/Bi	vojenský, letecký, spotřebitelský
199	Sn/Zn	spotřebitelský
<180	Sn/Bi/Zn	
138	Sn/Bi	

Samotný cín má nízkou teplotu tavení, dobrou smáčivost, je měkký a tvárný. Bohužel, díky těmto vlastnostem je i málo mechanicky odolný. Čistý cín je také velmi náchylný k cínovému moru, který vzniká při teplotách nižších než 13 °C. Právě pro potlačení cínového moru a zlepšení mechanických vlastností se k cínu přidávají další prvky, které mechanickou odolnost zvyšují. Bohužel, mají i nežádoucí vlastnosti jako zhoršení smáčivosti. Kromě těchto záměrně přidaných příměsí může být pájka kontaminována i dalšími prvky, které se do ní dostanou během pájení z DPS (desky plošných spojů) nebo z vývodů součástky [5].

### 1.1.1 Vliv jednotlivých příměsí na vlastnosti pájky

Příměsí v pájkách mohou mít pozitivní i negativní vliv na kvalitu pájeného spoje. Výpis nejvýznamnějších příměsí podle literatury [3] uvádí nejčastější příměsí:

**Hliník (Al):** malé množství hliníku se rozpustí v Sn při zvýšených teplotách. 0,001% Al v pájce vede ke zhoršení adheze, zrnitosti, větší viskozitě pájky, praskání

z důvodů křehkosti za tepla a podporuje oxidaci povrchu pájky. Hliník se používá na výrobu nosných rámečků DPS.

**Antimon (Sb):** 0,3% výrazně zlepšuje smáčivost, omezuje růst whiskerů (mechanicky odolné krystaly jehlicovitého tvaru) a eliminuje cínový mor. Příměs Sb zvyšuje pevnost, ale výrazně nezhoršuje vlastnosti pájky.

**Arsen (As):** jedná se o škodlivou příměs, nerozpustnou v solidu Sn nebo Pb, která tvoří dlouhé jehlice v mikrostruktuře a způsobuje nesmáčivost.

**Bismut (Bi):** není považován za nečistotu v pájce, ale za příměs do slitiny. Zlepšuje smáčecí charakteristiky a při solidifikaci vede k pozitivním změnám v mřížce.

**Kadmium (Cd):** je nežádoucí a toxické. Působí jako pájecí jed a podporuje oxidaci povrchu pájky. Zanedbatelná je jeho rozpustnost v tuhé fázi. Tvoří intermetalické sloučeniny, ale snižuje teplotou tavení.

**Měď (Cu):** vyznačuje se zanedbatelnou rozpustností v tuhé fázi, tvoří dvě ortorombické (kosočtverečné) intermetalické sloučeniny. Kontaminace pájky vede k větší zrnitosti, křehkosti, viskozitě a zvyšuje teplotu tání. Částečné odstranění mědi ze slitiny se provádí přidáním síry nebo odstraněním povrchové vrstvy slitiny při nižší teplotě.

**Zlato (Au):** zanedbatelná je jeho rozpustnost v tuhé fázi. Tvoří intermetalické sloučeniny, matný vzhled a mnoho strusky. Max. 0,2% způsobuje křehkost.

**Železo (Fe):** žádná rozpustnost v tuhé fázi, tvoří intermetalické sloučeniny. Způsobuje křehkost a zrnitost.

**Nikl (Ni):** žádná rozpustnost v tuhé fázi, tvoří intermetalické sloučeniny s cínem.

**Stříbro (Ag):** žádná rozpustnost v tuhé fázi, tvoří intermetalické sloučeniny. Způsobuje zrnitost a důlky v povrchu pájky.

**Zinek (Zn):** zanedbatelná rozpustnost v tuhé fázi, netvoří intermetalické sloučeniny. Škodlivý v koncentraci nad 0,005%. Způsobuje zrnitost povrchu, výrazně zhoršuje smáčecí charakteristiky a podporuje oxidaci povrchu pájky.

### 1.1.2 Pájka SAC (Sn/Ag/Cu)

Jedna z nejpoužívanějších je pájka SAC305, která obsahuje 96,5% cínu, 0,3% stříbra a 0,5% mědi (Sn96,5/Ag3,0/Cu0,5). Teplota tavení této pájky je 217 – 218°C[6]. Používá se však i pájka s koncentrací Ag v rozmezí od 3,0 – 4,7% a s koncentrací Cu od 0,5 – 1,7% [6].

Všechny SAC pájky umožňují pracovní teploty zařízení okolo 175°C bez výrazných známek degradace pájeného spoje. Horší smáčivost měděného povrchu je kompenzována použitím tavidel s vyšší teplotou aktivace. Pro lepší smáčivost může být použita také dusíkatá ochranná atmosféra. SAC pájené spoje se vyznačují vysokou spolehlivostí a odolností proti únavě [5][6].



### 1.1.3 Pájka Sn/Cu

Používá se eutektická slitina Sn<sub>99,3</sub>/Cu<sub>0,7</sub> s teplotou tavení 227°C. Stejně jako předchozí slitina umožňuje vysoké pracovní teploty a je odolná vůči únavovým defektům [5][7].

Existuje například pájka Sn<sub>100</sub>Sb, která obsahuje navíc nepatrné množství niklu a antimonu. Tato slitina nevyžaduje dusíkatou ochrannou atmosféru, je méně agresivní vůči nerezové oceli a dalším materiálům pájecí lázně. Vykazuje výborné vlastnosti pro pájení vlnou [5][7].

### 1.1.4 Pájka Sn/Ag

Eutektický poměr pro tuto slitinu je Sn/Ag<sub>3,5</sub> s teplotou tání 221°C. Slitina má omezenou rozpustnost stříbra v cínu, čímž je odolnější vůči zhrubnutí než pájka Sn/Pb. Pro zlepšení struktury pájky při tuhnutí se do pájky někdy přidává i 1% zinku. Slitina má dostatečnou pevnost a smáčivost pájených povrchů [5][6].

### 1.1.5 Pájka Sn/Bi

Slitina má velice nízkou teplotu tavení a to jen 139°C (podle některé lit. 138°C). Proto se používá pro pájení teplotně citlivých součástek. Eutektické složení je Sn<sub>42</sub>/Bi<sub>58</sub>. Pokud je slitina kontaminována olovem, je bod tuhnutí sloučeniny Bi/Pb jen 97°C, to negativně ovlivňuje tepelné únavové vlastnosti, které jsou v případě nepřítomnosti olova lepší než u pájky Sn/Pb. Díky vysokému obsahu Bi vykazuje malou pružnost a rychlou oxidaci na vzduchu [5][6].

Hlavní nevýhodou bismutu je, že je vedlejším produktem při těžbě olova. Pokud spotřeba olova klesá, je také méně bismutu a cena pájky se zvyšuje [5][6].

### 1.1.6 Pájka Sn/In

Teplota tání slitiny Sn<sub>48</sub>/In<sub>52</sub> je 117°C. Díky indiu se v pájce zlato rozpouští pomaleji než v Sn/Pb pájkách a je odolná proti oxidaci [5][6].

Nevýhodou je koroze ve vlhkém prostředí. Indium je poměrně měkký kov se sklony k tvorbě studených spojů [5][6].

### 1.1.7 Pájka Sn/Sb

Používá se slitina Sn<sub>95</sub>/Sb<sub>5</sub> s teplotou tání 232 – 240°C. To ji předurčuje k vysokoteplotním aplikacím. Antimon zvyšuje tvrdost a pevnost, ale pokud je jeho podíl ve slitině větší než 4%, zhoršuje pevnost v tahu. Pokud použijeme tavidlo RMA (pryskyřičné mírně aktivované) bez ochranné atmosféry, je smáčivost mnohem lepší než u pájek Sn<sub>63</sub>/Pb<sub>37</sub> a Sn<sub>96,5</sub>/Ag<sub>3,5</sub> [6].

Sb je podobně jako Bi vedlejší produkt při výrobě olova. Proto s sebou nese již zmíněné problémy s rostoucí cenou [6].

## 1.2 Tavidla

Jsou látky používané pro usnadnění pájení. Po zahřátí napomáhají k dosažení rychlejšího a kvalitnějšího smáčení pájených povrchů pájkou. Rozdělení tavidel podle normy ČSN EN ISO 9454-1 je uvedeno v tab. 2, rozdělení podle ANSI J-STD-004 v tab. 3.

Funkce tavidla [3]:

- odstraňuje nečistoty a oxidy z pájeného povrchu,
- chrání před oxidací pájené plochy až do ukončení pájení,
- snižuje povrchové napětí pájky, umožňuje její snadnější rozlití,
- zlepšuje přenos tepla.

Složení tavidla [3]:

- tavidlový nosič (přírodní nebo syntetická pryskyřice, organická kyselina),
- aktivátor (kyseliny, které odstraňují oxidy kovů),
- rozpouštědlo (např. alkoholy, voda),
- aditiva (upravují vlastnosti tavidla – např. antishlukovací činidla).

Tab. 2: Členění tavidel dle ČSN EN ISO 9454-1[3].

Typ tavidla	Základní složka	Aktivátor	Forma tavidla
1. pryskyřicové	1. kalafuna (přírodní pryskyřice) 2. bez kalafuny Syntetická pryskyřice	1. bez aktivátoru 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	A tekuté B tuhé C pasta
2. Organické	1. rozpustné ve vodě 2. nerozpustné ve vodě	1. bez aktivátoru 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	A tekuté B tuhé C pasta
3. Anorganické	1. soli  2. kyseliny  3. zásady	1. NH <sub>4</sub> Cl 2. bez NH <sub>4</sub> Cl 1. kys. fosforečná 2. jiné kyseliny 1. Aminy nebo amoniak	A tekuté B tuhé C pasta

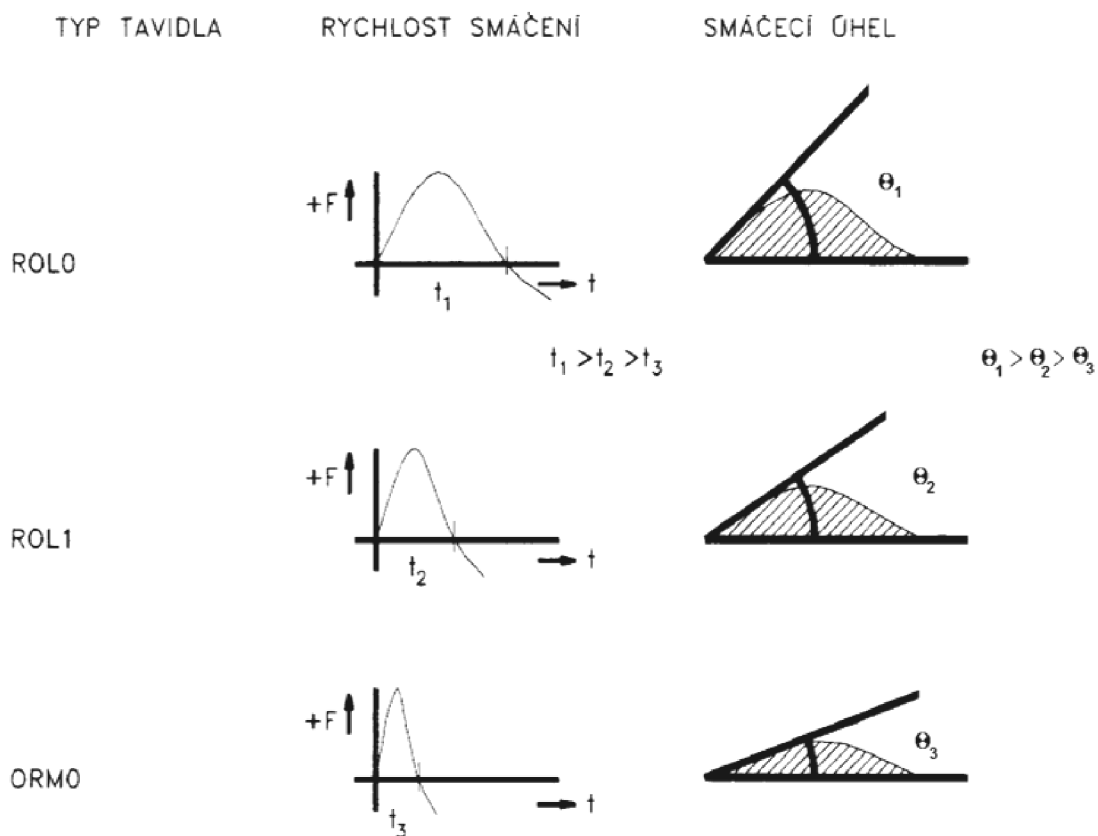
Tab. 3: Členění tavidel dle ANSI J-STD-004 [3].

Základ tavidla	Zkratka	Úroveň aktivace /% halidů /					
		L0	L1	M0	M1	H0	H1
		0	do 0,5	0	0,5 – 2	0	nad 2
přírodní pryskyřice	ROSIN <b>RO</b>	A	B	C	D	E	F
syntetické pryskyřice	RESIN <b>RE</b>	G	H	I	J	K	L
organické kyseliny	ORGANIC <b>OR</b>	M	N	P	Q	R	S
anorganické kyseliny	INORGANIC <b>IR</b>	T	U	V	W	X	Y

Použití tavidla s sebou nese i problém s odstraněním tavidlových zbytků po pájení. Zbytky tavidla mohou ovlivnit výsledný pájený spoj několika způsoby [8]:

- mohou snížit jeho životnost,
- mohou zhoršit elektrické vlastnosti,
- mohou způsobit korozi,
- mohou ztížit elektrické testování.

Tavidla jsou porovnávána podle korozivních vlastností, podle vodivosti tavidla a tavidlových zbytků. Vhodně se také hodnotí smáčecí schopnosti tavidla v kombinaci s pájkou pomocí meniskografu, měřením smáčecích úhlů a sledováním roztékavosti pájky na povrchu [3]. Jaký mají různá tavidla vliv na smáčecí úhel a rychlost smáčení, je uvedeno na obr. 1.



Obr. 1: Porovnání různých typů tavidel [3].

## 1.3 Způsoby pájení

Elektrotechnický průmysl je velice rozmanitý a každé jeho odvětví má různé nároky a požadavky na pájené spoje. Byla vyvinuta celá řada způsobů pájení, které se odlišují rychlostí, flexibilitou a také cenou pájení. Vždy je ale třeba pájku přetavit dle teplotního profilu, který je pro každou slitinu specifický.

Většina těchto zařízení musela být při přechodu na bezolovnaté pájky upravena z důvodu používání vyšších teplot, agresivnějších pájek atd.

### 1.3.1 Pájení vlnou

Jedná se o velice oblíbenou metodu pájení. Hlavní výhodou této technologie je možnost kombinované povrchové montáže neboli zapájení vývodových i SMD součástek (SMD součástky musí být na spodní straně DPS). Naopak nevýhodou je

vysoká cena provozu (energetické náklady na udržení roztavené pájky v lázni), vysoká oxidace pájky v lázni a s tím spojené časté čištění, velké teplotní namáhání součástek a DPS. Vyšší oxidaci lze omezit ochrannou atmosférou.

Princip metody: na vyvrtanou a upravenou desku plošného spoje je nanášeno lepidlo mezi vodivé plošky. Do tohoto lepidla jsou osazeny SMD součástky a lepidlo je následně vytvrzeno. Poté jsou osazeny vývodové součástky a konce zahnuty. Takto připravená deska je dána do pece, kde je uchycena do dopravníku. Na desku je nanášeno tavidlo (např. sprejem), následuje přehřev (aktivace tavidla) a přejetí desky přes turbulentní vlnu (zapájení přilepených SMD součástek) a přes klidnou vlnu (zapájení vývodových součástek – vlna je pomalejší, takže pájka má čas vytvořit dokonalý meniskus s dostatečným množstvím pájky). Následuje chlazení, které zajistí vytvoření požadované mikrostruktury pájeného spoje [3].

### 1.3.2 Pájení přetavením (reflow soldering)

Při tomto technologickém postupu se součástky osazují do pájecí pasty, která se přetaví při teplotě, která je vyšší než bod tání pájky v pastě. Standardní teplotní profil je uveden na obr 2. Během pájení se osazené součástky samovolně vycentrují na plošky DPS díky povrchovému napětí pájky. Pájet je možné nejen desky s čistou jednostrannou či oboustrannou povrchovou montáží, ale i s kombinovanou povrchovou montáží [3].

Jedno z možných dělení přetavovacích pecí je na in-line (průběžné) a vsázkové. In-line pece jsou využívány především v průmyslu - jsou rychlejší a po prvotním nastavení nevyžadují trvale přítomnost obsluhy. Vsázkové se používají spíše v laboratorních podmínkách.

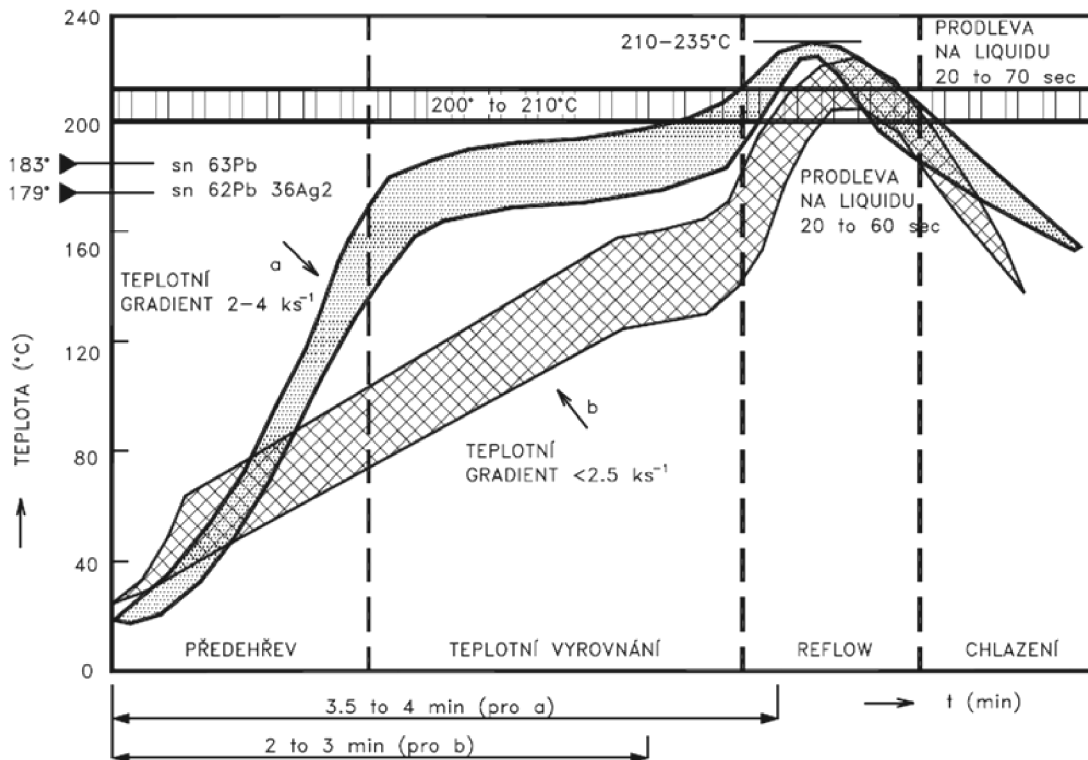
Pece se dělí také podle způsobu přenosu tepla[3]:

- vedením (kondukce),
- prouděním (konvekce),
- zářením (radiace).

**Vedením** - při kontaktu látek o různých teplotách předávají částice teplejší látky svou kinetickou energii látce s nižší teplotou. Tuto metodu lze použít pro pájení keramických substrátů, příp. vícevrstvých DPS s kovovým jádrem, tedy materiálů s velmi dobrou tepelnou vodivostí [3].

**Proudění** – zde dochází k přenosu tepla pohybem souboru molekul kapaliny nebo plynu. Konvekce je přirozená nebo nucená. U přirozené se jedná o proudění vzniklé pomocí gravitace, naopak nucená konvekce je vytvářena ventilátory a čerpadly [3].

**Záření** – zde je pájení založeno na přenosu tepla pomocí elektromagnetického vlnění.



Obr. 2: Porovnání teplotního profilu a) standardní pájecí pasty  
b) no – clean pájecí pasty [3].

### METODY PÁJENÍ PŘETAVENÍM:

Při pájení přetavením vznikají minimální zbytky tavidla nebo pájky, protože nanášíme přesně definované množství pájecí pasty na definovaná místa. Pájení přetavením má oproti pájení vlnou tyto výhody [9]:

- úspora materiálu,
- je vyloučena kontaminace pájeného spoje nečistotami,
- dosažení vyššího stupně hustoty montáže,
- nedochází zde k teplotním rázům,
- je možná oboustranná montáž SMD.

Metody pájení přetavením [3]:

- konvekční pájení,
- infračerveným zářením,
- pájení pomocí laseru,
- kondenzační metoda,
- kontaktní metody - vyhřátým nástrojem nebo pásem.

### Konvekční pájení

Konvekční pece se používají s přirozenou, ale také s nucenou konvekci. Teplo potřebné pro přetavení pájecí pasty se získává průchodem ohřátého plynu (dusík, vzduch, ev. vodík) pájecím prostorem. Plyn proudí většinou po obou stranách DPS. Pece se dnes konstruuje jako průběžné s dopravníkem (pásový, prstový) a s minimálně 4

nezávisle regulovatelnými teplotními zónami. Horký plyn se většinou usměřuje pomocí trysek, což zaručuje rychlejší ohřev součástek na DPS. Snahou je vyhnout se horizontálnímu proudění, aby nevznikaly hraniční vrstvy a šikmému proudění, aby nedocházelo k posunu součástek.

**Výhody [8]:**

- jednoduché nastavení teplotního profilu,
- malý příčný teplotní gradient (+2°C),
- menší zastínění jednotlivých součástek,
- vhodné pro pájení pouzder BGA a vícevrstvé DPS.

**Nevýhody [8]:**

- malá účinnost (20 až 30%),
- vyšší oxidace pájecí pasty při pájení bez ochranné atmosféry.

**Pájení infračerveným zářením**

Energie potřebná k přetavení pájecí pasty je získávána z IR zářičů. Množství tepla absorbované povrchem je závislé na koeficientu, jehož velikost souvisí s barvou povrchu a vlnovou délkou záření. Obecně platí, čím vyšší vlnová délka, tím nižší absorpce záření. Při infraohřevu nastává jev, kdy tmavší součástky jsou ohřívány více, než místa s pájecí pastou. Důsledkem je nerovnoměrné rozložení teploty na povrchu DPS, což má vliv na kvalitu pájení a tepelné namáhání součástek [3].

Pece jsou konstruované jako průběžné se zářiči nad i pod dopravním pásem. Zářiče jsou umístěny v jednotlivých sekcích. Teplotní profil se nastavuje teplotou v jednotlivých zónách a rychlostí dopravního pásu.

**Výhody[3]:**

- vysoká účinnost procesu 60-70%.

**Nevýhody[3]:**

- nehomogenní ohřev, který závisí na vlastnostech materiálu DPS,
- teplotní odpor a kapacity součástek,
- velký rozdíl teplot při měření příčného teplotního profilu,
- nevhodné pro pouzdra BGA (Ball Grid Array).

### **1.3.3 Pájení v parách**

Probíhá v uzavřené nádobě obsahující inertní kapalinu s přesně definovaným bodem varu. To zaručuje konstantní teplotu v celém prostoru. Nasycené páry inertní kapaliny neobsahují kyslík, proto nedochází k oxidaci pájených spojů. Kondenzační pece se skládají z nádoby, která má vyhřívané dno, inertní kapaliny a vertikálně pohyblivého roštu na kterém je umístěn substrát. Substrát se součástkami je umístěn nad kapalinou v kondenzovaných parách. Nasycené horké páry jim předávají teplo (kondenzují na nich), dokud nedosáhnou teploty par. Po přetavení pájecí pasty je spuštěno chlazení a pára se změní na kapalinu. Pece mohou být konstruovány jako vsázkové nebo in-line. Hlavní výhodou pájení v parách je přesně definovaný bod varu kapaliny, který určuje mezní hodnotu teploty přetavení. Nevýhodou pájení v parách je

delší pájecí proces a vysoká cena kapaliny. Pro různé teplotní profily musí být odlišná kapalina [3][10].

### 1.3.4 Pájení horkým nástrojem

Jedná se o kontaktní metodu, která je využívána hlavně pro opravy z důvodu nízké produktivity této metody. Používá se ale i pro selektivní pájení součástek, na které nemohla být použita stejná metoda pájení jako na zbytek DPS, například kvůli velké citlivosti na vysoké teploty [9].

### 1.3.5 Pájení laserem

Provádí se řízeným laserovým paprskem pod úhlem 30% od kolmice na substrát. Využívá se YAG laseru, který je vhodný pro pájení Fine-pitch součástek. Jedná se o selektivní pájení součástek s malými roztečemi vývodů, které minimálně tepelně ovlivňuje okolní součástky [3]. Mezi nevýhody patří nízká produktivita a vysoká cena.

## 1.4 Vliv ochranné atmosféry

Přechodem na bezolovnaté pájky museli výrobci nalézt způsob, jak minimalizovat horší vlastnosti bezolovnatých pájek. Jedním z možných řešení je použití ochranné atmosféry při procesu pájení.

#### **Výhody použití ochranné atmosféry [4]:**

- ochrana proti oxidaci – méně O<sub>2</sub> a vlhkosti,
- snížení spotřeby pájky a tavidla,
- lepší smáčivost,
- širší technologické okno,
- nižší náklady na čištění.

#### **Nevýhody:**

- vyšší pořizovací a provozní náklady.

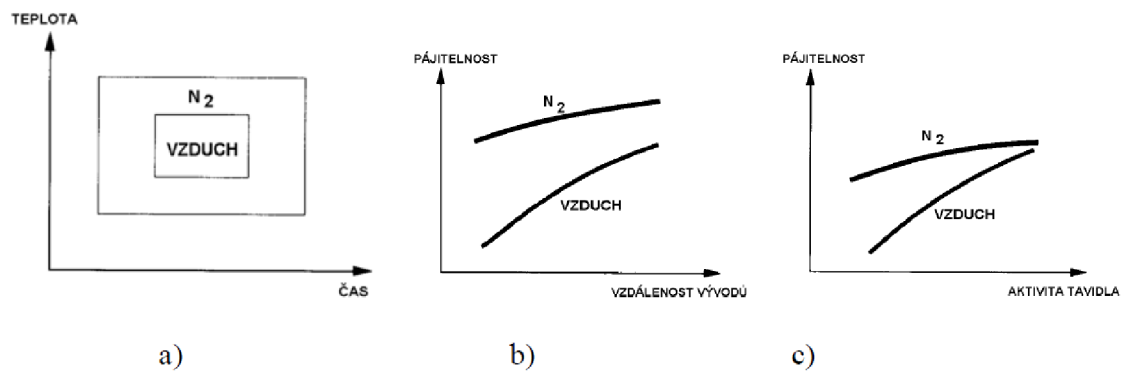
### 1.4.1 Dusíková ochranná atmosféra

Projevuje se výrazným snížením oxidace, v menší míře i zlepšením přenosu tepla a redukuje množství zkratů díky většímu povrchovému napětí pájky. Rovněž reziduí je za použití dusíku podstatně méně (uvádí se snížení o 60%) kvůli jejich snazšímu odpařování, zároveň se snadněji čistí, jelikož dusík zabrání jejich oxidaci [9].

#### **Přednosti dusíkové atmosféry [3]:**

- širší technologické okno (obr. 3a),
- pozitivní vliv na pájení součástek s menší vzdáleností vývodů (obr. 3b),
- menší spotřeba tavidla (obr. 3c).

Mezi další typy ochranných atmosfér patří ochranná atmosféra tvořená vodíkem nebo vzácnými plyny např.: argon, neon, xenon, atd. Ale vzhledem k vyšší ceně plynů se tyto typy používají výjimečně.



Obr. 3: Srovnání dusíkové atmosféry se vzduchem [3].



## 2 Pasty a jejich využití v elektrotechnice

Pasivní sítě (např. vodivý obrazec, rezistory) na substrátech jsou vytvářené pomocí materiálů, které se dodávají ve formě past. Dodávané pasty mají tzv. tixotropní vlastnosti – s rostoucí třecí silou se snižuje viskozita pasty. To má za následek vyšší tekutost pasty při jejím nanášení a při odtrhávání síta nebo při sejmutí šablony ze substrátu. Poté, co třecí síla zanikne, se viskozita pasty vrátí na původní hodnotu. Každá pasta se skládá ze tří základních složek: funkční, tavivové a pojivové. Snahou je, aby všechny použité modifikátory upravující vlastnosti pasty byly odstraněny během přehřevu.

Používané pasty byly rozděleny do kapitol na pasty pro tlustovrstvou technologii a na pájecí pasty.

### 2.1 Pasty pro tlustovrstvou technologii

Pasty pro tlustovrstvou technologii jsou využívány k realizaci vodivých obrazců, rezistorů, kondenzátorů, senzorů, atd. Vytvořené motivy musí být napřed zasušeny při teplotách okolo 200°C a poté se vypalují podle, pro pastu doporučeného, teplotního profilu při teplotách přesahujících většinou 800°C (př. teplotního profilu je uveden na obr. 4). Z důvodu používání takto vysokých teplot se tlustovrstvá technologie realizuje většinou na keramice.

**Funkční složka**, většinou ve formě kuliček, určuje charakter pasty a je tvořena částicemi drahých kovů u vodivých materiálů nebo částicemi dielektrických a skelných frit u izolačních materiálů. U odporových materiálů je složení funkční složky závislé na použitém odporovém systému, jehož základ může tvořit směs drahých kovů (např. PdAg) nebo oxidy (např. Ru<sub>2</sub>O). Velikost částic se pohybuje řádově v μm a musí být dostatečně malá oproti velikosti ok síta [11].

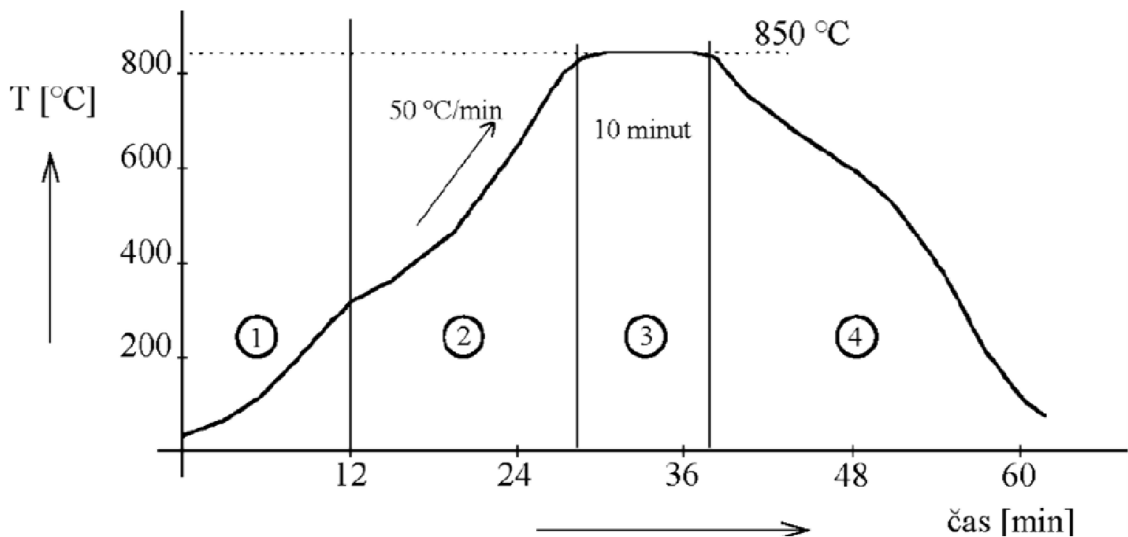
**Tavivová složka** je tvořena skleněnou fritou, díky níž dochází k vytvoření vazby mezi funkční složkou a substrátem. Proto se používají pro tavivovou složku nízkotavná skla s teplotou měknutí již od 600°C [11].

**Pojivová složka** obsažená v pastě zajišťuje její tiskové vlastnosti – viskozitu a tvoří ji organické látky jako např. terpineol, butyldiglykolacetát apod. Tato složka se v průběhu tepelného zpracování odpaří a nepodílí se na konečné funkčnosti vrstvy [11].

Pasty lze dále rozdělit podle jejich funkce na vodivé, odporové, dielektrické (izolační) a speciální.

**Vodivé pasty** využívají jako funkční složku drahé kovy (Au, Pd, Pt, Ag), především pro jejich stálost a netečnost vůči vlivům prostředí.

**Odporové pasty** využívají jako funkční složku různé směsi drahých kovů, které u některých systémů vytvářejí oxidy (např. RuO<sub>2</sub>). Hodnota odporu je nastavována poměrem vodivé (kovové) části a tavivové (skelné) složky.



Obr. 4: Podélný teplotní profil pro výpal tlustých vrstev [11].

**Dielektrické pasty** tvoří materiály používané pro keramické kondenzátory (typ I nebo II) a u izolačních past různé typy skelných frit.

**Speciální pasty** – jedná se o další předem připravené funkční směsi. Tyto materiály se řadí do skupiny speciálních past, jako jsou např. termistorové, magnetické, luminiscenční, stínící a také pasty pro chemické senzory apod.

## 2.2 Pájecí pasty

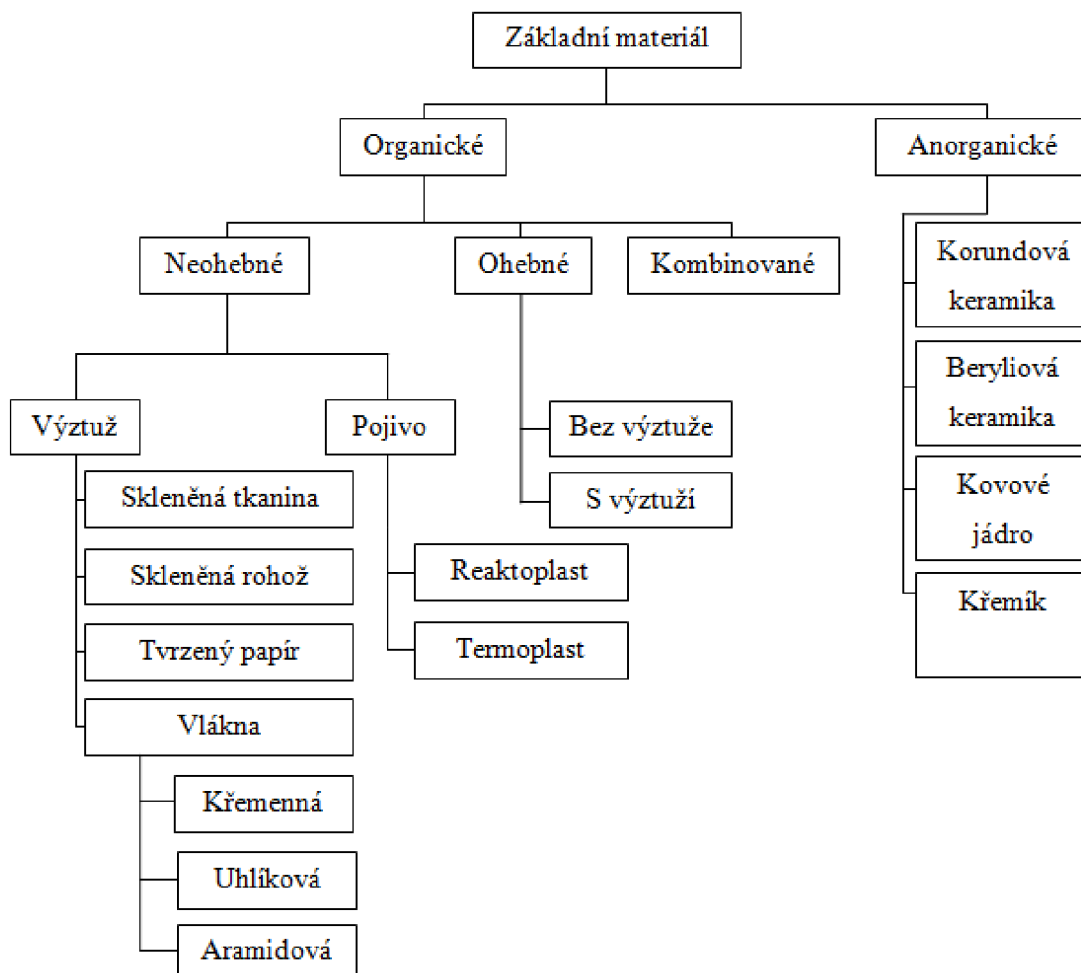
Pájecí pasty slouží k vytvoření vodivého spoje na předem definovaných místech. Používají se hlavně pro kontaktování SMD součástek, ale je možno kontaktovat i součástky vývodové. Pasta se skládá z kuliček pájky o velikosti od 5 - 150 $\mu$ m (podle typu a určení pasty), gelového tavidla a reologických modifikátorů upravujících tiskové vlastnosti past [3].

Hmotnostní podíl kovové složky (pájky) v pastě ovlivňuje viskozitu pasty a se vzrůstajícím podílem kovové složky se snižuje vliv teploty na viskozitu [3].

Pájecí charakteristiky pasty značně nepříznivě ovlivňují oxidy kovů, které v pastě vznikají zcela přirozeně stárnutím a nevhodným skladováním (skladují se v chladničkách). Oxidy kovů mají mnohem vyšší teploty tavení ( $\text{SnO}_2 > 1930^\circ\text{C}$ ,  $\text{PbO} > 890^\circ\text{C}$ ) než samotná pájka a vyskytují se tím ve větší míře, čím menší průměr zrn pájka obsahuje – oxiduje větší plocha pájky [3].

### 3 Základní materiál substrátu

Základní materiály (nosné substráty) jsou elektroizolační nosné podložky, které po osazení součástkami určují výsledné vlastnosti DPS. Vyrábějí se ve formě pevné, ohebné nebo kombinované, aby vyhovovaly co nejvíce konečné funkci obvodu. Celkové rozdělení ZM (základní materiál) je uvedeno na obr. 5.



Obr. 5: Rozdělení základních materiálů [3].

#### Základní požadavky na ZM [3]:

- velký povrchový izolační odpor,
- velký vnitřní izolační odpor,
- malá permitivita,
- nízký ztrátový činitel,
- ohnivzdorný – samozhášivý,
- vysoká teplota skelného přechodu,
- dobrá tepelná vodivost,
- malá teplotní roztažnost,
- levné,
- dobrá opracovatelnost,
- pevnost v ohybu,
- rovinnost.

Většina parametrů si ale navzájem odporuje, proto konstruktér při návrhu DPS musí volit optimální řešení pro daný výrobek.

## 3.1 Organické základní materiály

Organické ZM jsou složeny z organických pryskyřic a výztuže, což vytváří nosný substrát, který je použit pro naplátování měděné fólie a následné vytvoření vodivého obrazce subtraktivní technologií (chemické odleptání přebytečné mědi). Pokud je vodivý obrazec vytvářen aditivní technologií (chemické pokovení mědi), používá se namísto naplátované měděné fólie ZM s přísadou speciálních složek.

Neohebné základní materiály používají zpravidla jako pojivo termosety, které se vyznačují velkou tvrdostí vzhledem k vysoce zesíťným polymerním řetězcům.

### Používané termosety [3]:

- fenolformaldehydová pryskyřice,
- epoxidové pryskyřice,
- polyesterové pryskyřice (PE),
- polyamidové pryskyřice (PI),
- bismaleinimidové pryskyřice (BI),
- kyanáttestery (CE).

### 3.1.1 Základní neohebné organické materiály:

**FR-1, FR-2** – Jako výztuž je použit celulózový papír, jako pojivo slouží fenolformaldehydová pryskyřice. Obsah pryskyřice se pohybuje od 35% do 58% (čím více pryskyřice, tím je materiál tvrdší).

Využívá se pro nenáročné aplikace (např. spotřební elektronika) v provedení jednovrstvá či dvouvrstvá DPS.

**Výhody:** dobře se vrtá a opracovává, je levná.

**Nevýhody:** velká navlhavost, malá odolnost vůči elektrickému oblouku, malá pevnost Cu fólie v odtrhu, horší tepelná odolnost, horší mechanické vlastnosti.

**FR-3** – Stejně jako FR-2 používá celulózový papír, ale jako pojivo používá epoxidovou pryskyřici. Nahrazuje FR-2 v náročnějších aplikacích.

**Výhody:** oproti FR-2 lepší mechanické, elektrické i tepelné vlastnosti, vyšší pevnost v odtrhu měděné fólie, menší navlhavost.

**FR-4, FR-5** – Pojivo je stejně jako u FR-3 epoxidová pryskyřice, ale jako výztuž je použita skleněná rohož nebo tkanina. Impregnované vrstvy skelné tkaniny jsou skládány na sebe a laminovány s Cu fólií po daný čas a při dané teplotě a tlaku. Proces laminace probíhá ve vakuu, aby mezi vrstvami nebyly vzduchové bubliny. Využívá se hlavně tam, kde nevyhovuje FR-2 a FR-3.

FR-5 má stejné složení jako FR-4, má však vyšší teplotu skelného přechodu ( $T_g = 160^\circ\text{C}$ ).

**Výhody:** dobré mechanické a elektrické vlastnosti, malá navlhavost, vyšší teplotní odolnost.

**Nevýhody:** horší mechanické opracování, cena 2x vyšší než u FR-2.

**CEM-1** – Materiál je tvořen papírem, který je krytý skelnou tkaninou a vše je spojeno epoxidovou pryskyřicí. Vlastnosti se pohybují mezi FR-3 a FR-4, ovšem je levnější než FR-4.

Přehled nejdůležitějších vlastností nepoužívanějších ZM je uveden v tab. 4.

Tab 4: Vlastnosti nepoužívanějších organických materiálů [3].

MATERIÁL		FR-2	FR-3	CEM-1	FR-4
Vlastnosti					
Povrchový izolační odpor	ohm	$1 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^{12}$
Vnitřní izolační odpor	ohm·cm	$2 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{13}$	$8 \cdot 10^{14}$
Permitivita (1MHz)	-	4,7	4,9	4,7	4,7
Ztrátový činitel (1MHz)	-	0,047	0,041	0,031	0,019
Teplota skelného přechodu	°C	105	110	130	130
TCE* xy/z (pro T menší než T <sub>g</sub> )	ppmK <sup>-1</sup>	18/300	18/300	13/230	13/60
Cenový faktor FR-4=1	-	0,5	0,65	0,85	1

\*TCE: součinitel délkové roztažnosti (Thermal Coefficient of Expansion)

Kapitola byla zpracována podle [3].

### 3.1.2 Základní ohebné organické materiály

Používají se většinou bez výztuže. Nejrozšířenější jsou materiály na bázi polyesterů a polyimidů. V malé míře se používají kompozitní substráty na bázi epoxidů, aramidového papíru i fluoropolymerů.

**Nejpoužívanější jsou:**

- Polyethylentereftalát – PET,
- Polyethylénaftalát – PEN,
- Polyimid – PI.

## 3.2 Anorganické základní materiály

Nejčastěji se jedná o elektroizolační keramické materiály, ovrstvené kovové jádro, feritový substrát nebo křemenné a skelné substráty. Přehled vlastností nepoužívanějších anorganických ZM je uveden v tab. 5.

**Výhody [3]:**

- dobrá tepelná vodivost,
- dobrá chemická odolnost,
- mechanická integrita,
- malá hodnota TCE.

**Nevýhody [3]:**

- vyšší hmotnost,
- vyšší cena,
- křehkost,
- rozměrová limitace,
- toxicita některých typů,
- horší opracovatelnost.

**Korundová keramika ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )** – Jeden z nejpoužívanějších typů keramiky, která je tvořena polykrystalickým oxidem hlinitým s malým množstvím kovových oxidů pro dosažení požadovaných fyzikálních vlastností. Používá se hlavně v multičipových modulech, na kterých se realizují vodivé, odporové i dielektrické motivy.

Tab 5: Vlastnosti vybraných anorganických ZM [3].

MATERIÁL Vlastnosti		Korundová keramika	Beryliová keramika	Kovové jádro	Křemík
Permitivita (1MHz)	-	9 – 10	6,5	5,4	3,8
Ztrátový činitel (1MHz)	-	0,08	0,04	- - -	?
Tepelná vodivost	$\text{Js}^{-1}\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$	34 – 38	250	2,1	1,9
TCE xy/z (pro T menší než $T_g$ )	$\text{ppmK}^{-1}$	7,5 – 8	8,5	5,5 – 6,5	8,0
Ekologičnost materiálu	-	vyhovuje	toxicita	vyhovuje	vyhovuje

**LTCC keramika** [13][14] - největší nevýhodou klasických keramických substrátů je jejich složité mechanické opracování. Jsou křehké a např. při zhotovování otvorů jsme odkázáni pouze na laser. Z těchto důvodů byla vyvinuta LTCC (Low Temperature Co – fired Ceramic) keramika. Dodává se v nevytvrzeném (polosurovém) stavu, díky čemuž se snadněji opracovává – vrtá, řeže.

Postup tvorby 3D struktury na LTCC je následující: po zhotovení otvorů, realizaci vodivých, dielektrických a rezistorových obrazců tlustovrstvou technologií se nanese pájecí pasta. Poté se vše zasuší, poskládají se jednotlivé vrstvy na sebe a celá 3D struktura se vypálí při teplotě cca 850°C. Vypalování trvá až 10 hodin, protože se struktura pomalu zahřívá a ochlazuje, aby nedošlo k potrhání nanesených obrazců. Vypalování celé struktury v jednom kroku šetří čas a peníze.

**Výhody:**

- každá vrstva je kontrolována a testována samostatně a v případě poškození nebo nepřesnosti je nahrazena,
- díky relativně nízké teplotě vypalování můžeme použít pasty s vysoce vodivými materiály (Au, Ag), namísto molybdenu a wolframu.

## 4 Spolehlivost pájeného spoje

Spolehlivost může být posuzována z různých hledisek, avšak z funkčního hlediska rozhoduje životnost pájeného spoje. Je to čas, po který je zaručena spolehlivá funkce, to znamená vodivost spoje. To je ovlivněno řadou faktorů, z nichž mezi ty nejzákladnější patří [1]:

- stárnutí materiálů,
- mechanické namáhání,
- teplotní namáhání.

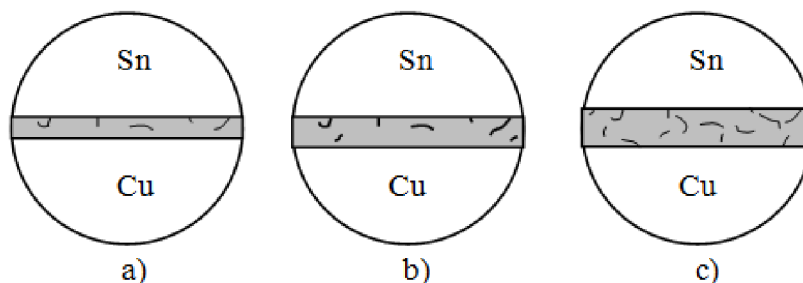
Pájený spoj je tvořen nejen pájkou – asi 75%, ale z 15 – 20% kontaktní plochou na substrátu a z 5 – 10% vývodem součástky. Z toho plyne nutnost zabývat se nejen samotnou pájkou, ale i ostatními částmi, které se na tvorbě pájeného spoje podílí [1].

### 4.1 Stárnutí pájeného spoje

Je ovlivněno tvorbou difuzní vrstvy na rozhraní mědi a cínu. Difuzní vrstva potvrzuje vytvoření pájeného spoje, ale díky tomu, že s postupem času narůstá a zvětšuje svoji tloušťku, zvyšuje elektrický odpor spoje a může ho i mechanicky narušit. Nadměrný růst této vrstvy může být vyvolán v samotném počátku vzniku spoje při ohřevu (příliš vysoká teplota nebo dlouhá doba ohřevu), nebo následně ohřevem spoje v průběhu provozu [1].

Difuzní vrstva je tvořena intermetalickými slitinami  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ,  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , atd. (při použití SAC pájek vzniká intermetalická slitina  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ ). Tato vrstva dosahuje tloušťky řádově v mikrometrech, ale může narůst až na několik desítek mikrometrů [1].

Protože se životnost spojů pohybuje v řádu několika let, provádí se tzv. zrychlené zkoušky. Jedná se o simulování pracovního režimu při zvýšené teplotě (nebo střídání záporných a kladných teplot), které mohou být doplněny zvýšenou relativní vlhkostí. Tyto podmínky urychlují stárnutí pájeného spoje – intermetalická vrstva narůstá rychleji, čímž se snižuje vodivost spoje a jeho mechanická pevnost, spoj degraduje a postupně ztratí funkčnost. Schematické zobrazení tohoto jevu je uvedeno na obr. 6 [1].



Obr. 6: Znázornění vlivu stárnutí a namáhání v intermetalické vrstvě  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  [1]:

- ve vrstvě se objevují trhliny,
- vrstva roste, trhlin přibývá a zvětšují se,
- vrstva a trhliny jsou tak velké, že může dojít k nefunkčnosti spoje.

## 4.2 Mechanické namáhání

Mechanické namáhání způsobuje únavu materiálu pájeného spoje, která se projevuje zhoršením mechanických vlastností pájky a následně mechanickým narušením spoje.

### Dva typy mechanického namáhání [1][3]:

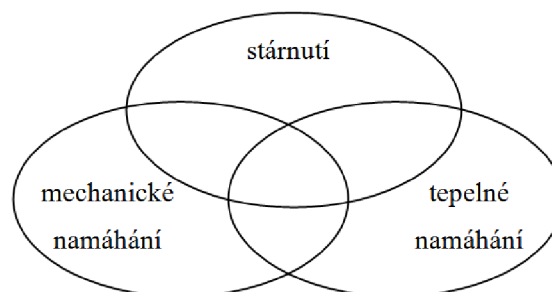
- externí – zvenčí působící síly, např. vibrace,
- interní – namáhání spoje v důsledku změn vnitřních poměrů.

Mechanické namáhání pájeného spoje je závislé na mnoha faktorech. Jedním z nich je například tvar vývodů součástky. Pružné vývody (drátové, typ gullwing) redukuje mechanické namáhání spoje více, než např. kontakty SMD součástek. Přitom nezáleží, zda je namáhání způsobeno rozdílným TCE součástky a substrátu nebo prohnutím montážního celku nebo vibracemi [1][3].

## 4.3 Tepelné namáhání

Tepelné namáhání je důsledkem tepla působícího na pájený spoj. Zdrojem tepla může být okolí nebo samotný obvod díky vlivu vyzařovaného ztrátového výkonu. Důsledkem rostoucí integrace je růst vyzařovaného výkonu na stále menší ploše [1].

Teplo vyvolává vratné a nevratné jevy. Mezi nevratné se řadí stárnutí materiálu, difuze atd. a mezi vratné jevy patří změny rozměrů, průhyby materiálu apod. Z výše uvedených informací je vidět, že spolu všechny tři faktory úzce souvisí (obr. 7 [1]).



Obr. 7: Znázornění faktorů ovlivňujících životnost pájených spojů[1].



## 5 Mechanické testování pájených spojů

Testování pájených spojů je mechanické, elektrické, optické a stárnutím materiálu, přičemž stárnutí materiálu bylo popsáno okrajově v předchozí kapitole. Tato kapitola bude z důvodu rozsahu práce zaměřena jen na mechanické testování.

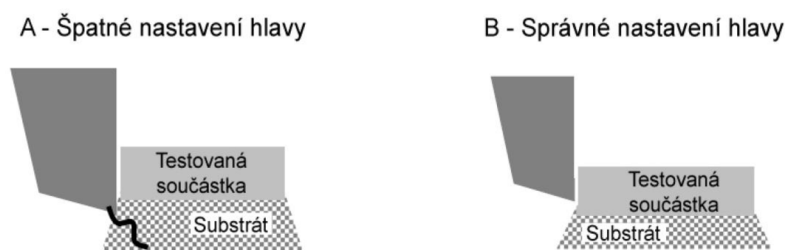
Metodikou provádění mechanických zkoušek se zabývá hlavně norma ČSN EN 62137 – 1 – (1 – 5). Toto testování pomáhá analyzovat mechanické vlastnosti pájených spojů. Poznání mechanických vlastností spojů nabývá na důležitosti v důsledku stále větší integrace (používání menších součástek a čipů) a tím i zmenšování vývodů a pájených spojů.

Mechanické zkoušky se používají pro znázornění deformace pájky v závislosti na čase, při působení vnějších zatěžovacích sil. Spoje testujeme vibracemi, stříhem, tahem, krutem, ohybem atd. Pájené spoje jsou mechanicky omezené na rozhraní mezi substrátem a pájkou, protože substrát se deformuje pružně na rozdíl od pájky, která se deformuje nepružně [15]. Z důvodu rozsahu a zaměření této práce se bude kapitola blíže zabývat jen zkouškou stříhem.

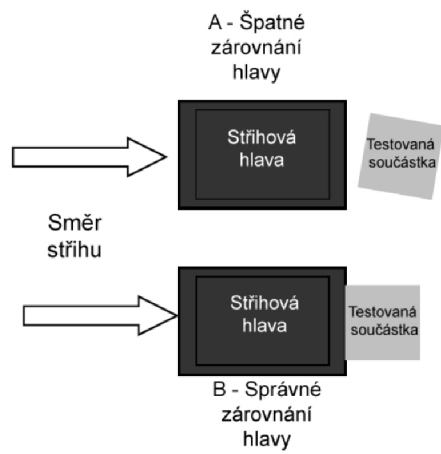
### 5.1 Zkouška stříhem

Jedná se o zkoušku, která je využívána pro testování pevnosti pájeného spoje, hodnocení stupně trhlin a poškození spoje. Podmínky zkoušky pevnosti ve smyku jsou uvedeny v normě ČSN EN 62137 – 1 – 2 a v normě ČSN EN 60749 – 19 jako zkouška pevnosti čipu stříhem. Bohužel tato metoda testování není vhodná pro všechny typy pouzder. Hodí se pouze pro testování součástek určených pro povrchovou montáž. Není vhodná pro vývodové součástky, QFP pouzdra (Quad Flat Package), pro flip – chip technologii a pro flexibilní substráty [15].

Metoda testování stříhem zkoumá sílu potřebnou pro utrnutí součástky ve spoji. Potřebná síla je závislá na pevnosti a množství pájky a velikosti trhlin, které se v ní vytvoří během přetavení. Testuje se většinou při pokojové teplotě, ale je možné testování provádět i při zvýšené teplotě nebo po teplotním cyklování [18]. Důležité pro správnost naměřené odtrhové síly je rovnoběžné nastavení trhačí hlavy a trhané součástky (obr. 9). Pokud by trhačí hlava nebyla rovnoběžně se součástkou, došlo by k předčasnému popraskání pájky a zaznamenání špatné hodnoty odtrhové síly. Stříhová hlava také nesmí být příliš daleko od substrátu, protože musí tlačit do  $\frac{3}{4}$  boční výšky součástky (obr. 8). Naopak, pokud by byla stříhová hlava umístěna tak nízko, až by se dotýkala substrátu, opět by to vedlo ke zkreslení výsledků. Velice důležité je také správné uchycení testovací DPS, protože deska se při testu nesmí posunout [16].



Obr. 8: Nastavení výšky stříhové hlavy dle [16][17].

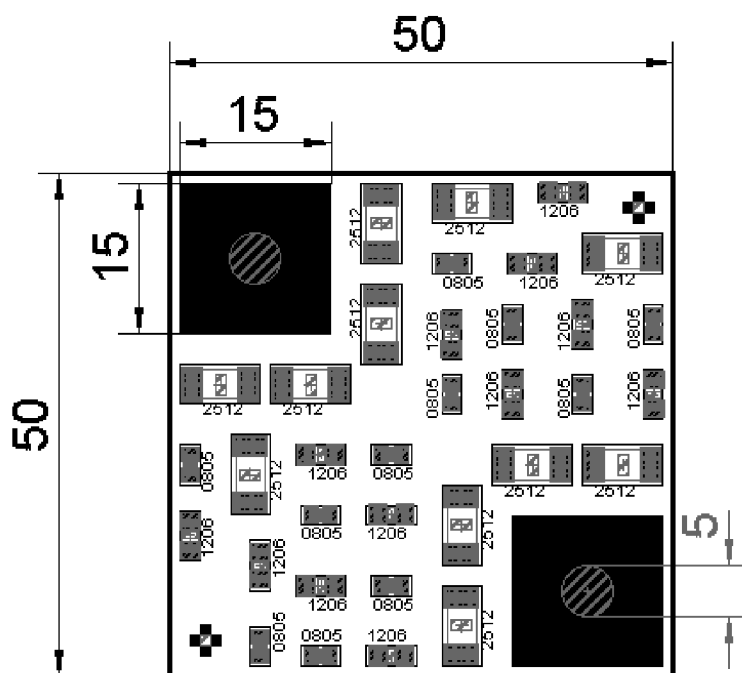


Obr. 9: Zárovnání stříhové hlavy dle [16][17].

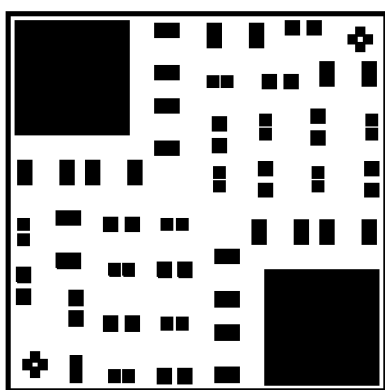
## 6 Praktická část

### 6.1 Návrh a výroba testovacích substrátů

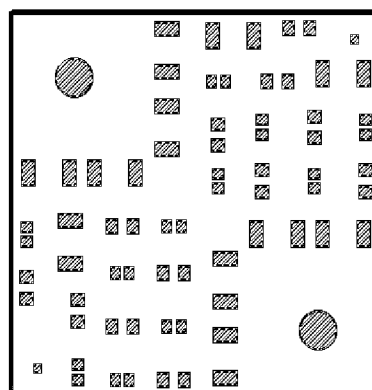
Cílem praktické části bylo navrhnout motiv na keramickou destičku, který bude vyhovovat následným zkouškám pevnosti pájených spojů SMD součástek o různých velikostech. Pro návržení zkušební destičky byl zvolen program Eagle 6.3.0. Light, který vyniká snadnou obsluhou a obsahuje všechny požadované funkce i ve volně dostupné verzi.



Obr. 10: Návrh motivu testovací destičky s rozmístěním součástek.



Obr. 11: Návrh motivu vodivé pasty.



Obr. 12: Návrh motivu pájecí pasty.

Obrazec je navrhnout na korundovou keramickou destičku o rozměrech 50 x 50 mm (obr. 10). Na destičce jsou umístěny SMD součástky o velikostech 2512, 1206 a 0805 – menší rozměry nejsou použity z důvodu horší manipulace při osazování a horšímu optickému posuzování vzhledu spoje. Dále jsou na destičce umístěny 2 plochy velikosti 15 x 15 mm, na které bude natisknuta pájecí pasta o průměru 5 mm pro optické měření

smáčecího úhlu pájky. Vodivá vrstva mezi vodiči není nutná, neboť nebudou testovány elektrické vlastnosti spoje. Vzdálenosti jednotlivých plošek pro umístění součástek jsou 4 – 5 mm z důvodu, aby mezi ně mohla být vložena stříhová hlava. V levém dolním a pravém horním rohu byly umístěny soutiskové značky, které slouží ke správnému sesouhlasení šablon při tisku vodivého obrazce a pájecí pasty. Návrh vodivého obrazce je uveden na obr. 11, návrh obrazce pájecí pasty na obr. 12.

Tisk vodivého motivu byl proveden přes vytvořené síto na sítotiskovém poloautomatu na čistou keramickou destičku. Výpál byl proveden v průběžné peci BTU podle profilu zadaného výrobcem pasty. Použita byla stříbrná pasta CSP – 1381 od výrobce Conductive Paste. Údaje o parametrech natisknutého vodivého motivu jsou uvedeny v tab. 6.

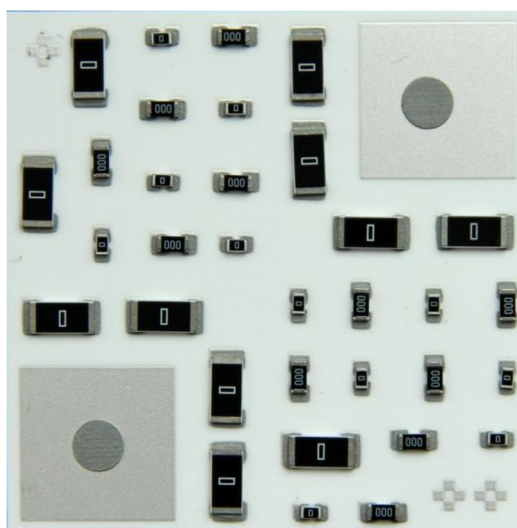
Tab 6: Parametry natisknutého motivu.

Parametr	Hodnota
Typ vodivé pasty	CSP – 1381
Tloušťka mokrého motivu	30 $\mu$ m
Tloušťka zasušeného motivu	24 $\mu$ m
Tloušťka vypáleného motivu	22 $\mu$ m

Tisk pájecí pasty byl proveden na zařízení pro ruční šablonový tisk přes měděnou šablonu o tloušťce 150 $\mu$ m. Použity byly pájecí pasty uvedené v tab 7. Následně byl substrát osazen SMD součástkami na ručním SMT manipulátoru. Výsledný substrát je zobrazen na obr. 13.

Tab 7: Použité pájecí pasty.

Výrobce	Označení	Složení
Kester	NXG1 - HF	Sn99/Ag0,3/Cu0,7
Kester	R256	Sn62/Pb36/Ag2

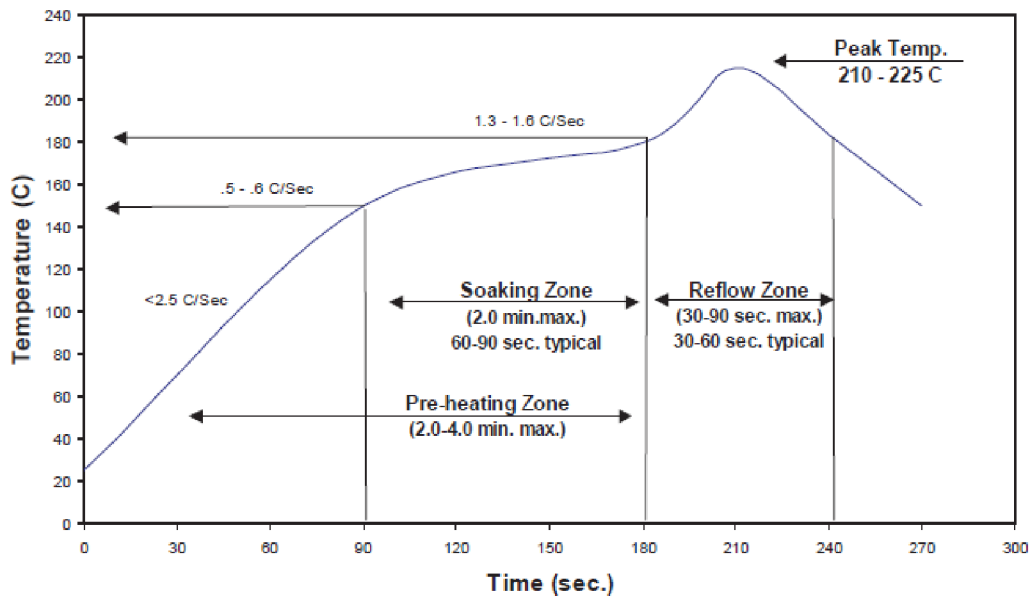


Obr. 13: Osazený substrát.

**Pasta NXG1-HF** – Jedná se o bezolovnatou SAC pájecí pastu, bez nutnosti čištění (no-clean). Pájecí pasta neobsahuje halogeny ani halidy. Složení pasty je

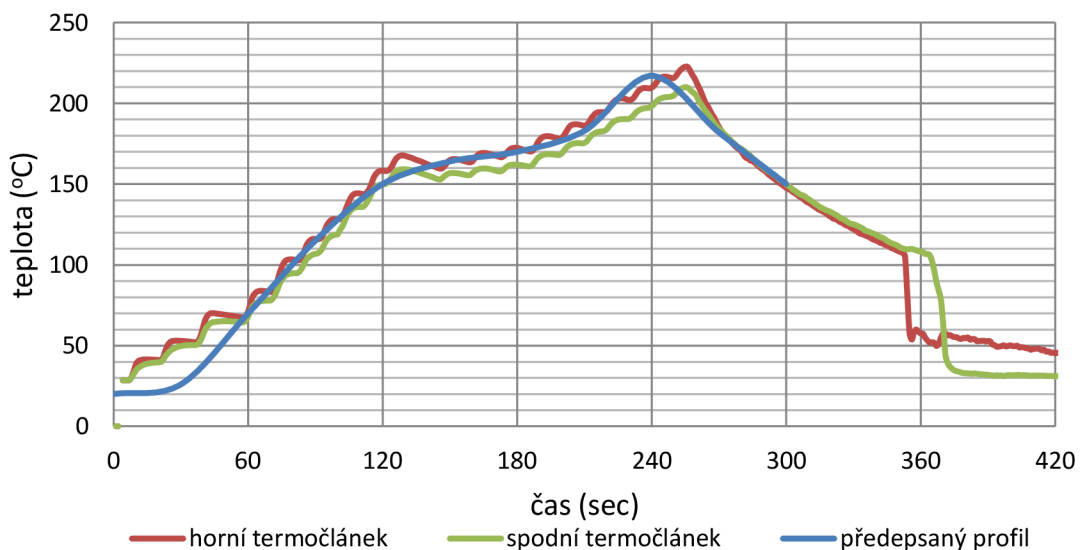
Sn99/Ag0,3/Cu0,7 a obsahuje 11,75% tavidla ROL0 (základ přírodní pryskyřice, bez halidů). Určena je pro šablonový tisk s následným přetavením ve vzduchové i dusíkaté atmosféře [21].

**Pasta R256** – jedná se o olovnatou pájecí pastu se složením Sn62/Pb36/Ag2 bez nutnosti čištění po přetavení (no-clean) určenou především pro šablonový tisk s co nejširším oknem pro přetavení (obr. 14). Pasta obsahuje 2% stříbra, aby se omezilo spotřebovávání stříbra z kontaktů součástek. Obsahuje 10% tavidla na bázi přírodní pryskyřice ROL0. Jedná se o vysoce aktivovanou pájecí pastu, u které není nutné pro typické aplikace provádět čištění po přetavení. Vhodná je pro pájení na vzduchu i v dusíkaté atmosféře [20].



Obr. 14: Přetavovací profil pro pastu R256 [20].

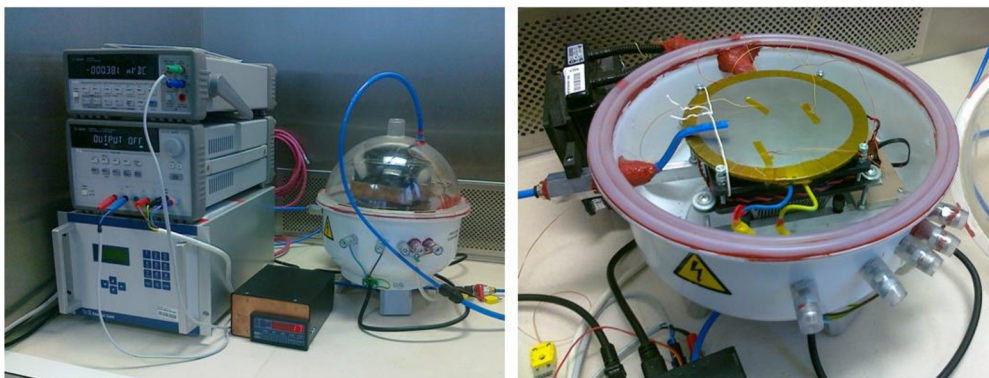
Na zkušebním pájecím zařízení naměřený teplotní profil pro pastu R256 je uveden na obr. 15.



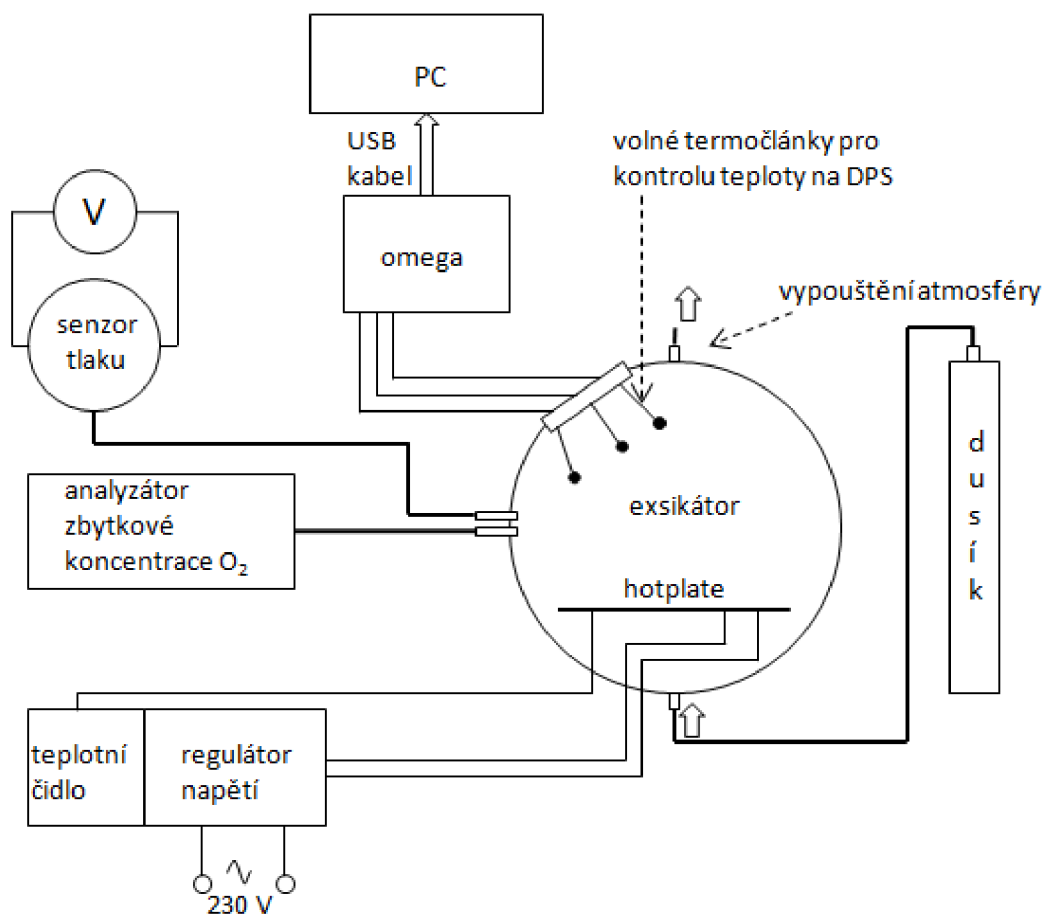
Obr. 15: Na exsikátoru naměřený teplotní profil pro pastu R256.

## 6.2 Popis experimentálních zařízení

Pro zapájení osazených substrátů bylo využito laboratorní zařízení exsikátor (obr. 16), který je podobný vsázkové přetavovací peci s formou ohřevu kondukcí (vedením) s ochrannou atmosférou. Jádrem zařízení je výhřevná destička s topným tělesem (TLV meandr na spodní straně) o výkonu 1000W s napájením 230V (princiální schéma exsikátoru je uvedeno na obr. 17). K samotné regulaci teploty slouží termočlánek upevněný na topné desce, který snímá aktuální teplotu na desce. Regulátor zvyšuje/snižuje napájecí napětí topné desky na základě signálu z termočláneku a tím ovlivňuje teplotu topné desky. Celý pracovní prostor měřící aparatury je možno hermeticky uzavřít. Na spodu měřící aparatury je otvor pro přívod ochranné atmosféry, boční ventil slouží k měření zbytkové koncentrace  $O_2$  (ROL – Residual Oxygen Level) a v horní části měřící aparatury je vývod sloužící k odvodu přebytku atmosféry. Chlazení destičky je realizováno pomocí vodního chlazení od firmy Corsair v kombinaci s ventilátory tak, aby byl dosažen teplotní profil výrobce [19].



Obr. 16: Laboratorní apertura - exsikátor a detail topné desky.



Obr. 17: Schéma laboratorní aparatury s dusíkovou atmosférou – exsikátor.

Pro testování mechanické pevnosti ve stříhu bylo použito zařízení Dage PC2400, jehož fotografie je uvedeno na obr 18.

Pro testování byly na zařízení nastaveny tyto parametry:

- rychlost hrotu při testování výšky od desky: 300 $\mu\text{m/s}$ ,
- výška hrotu od substrátu při testu: 150 $\mu\text{m}$ ,
- rychlost posuvu hrotu při testu: 17 $\mu\text{m/s}$ ,
- vzdálenost, kterou ujede hrot po utržení součástky: 500 $\mu\text{m}$ ,
- rozsah zatížení - pro součástky 2515: 20kg,  
- pro součástky 1206 a 0805: 15kg,
- procentní pokles z max. hodnoty, kdy se test ukončí: 20%,
- destruktivní test.

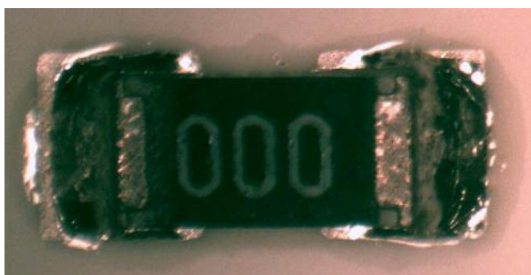




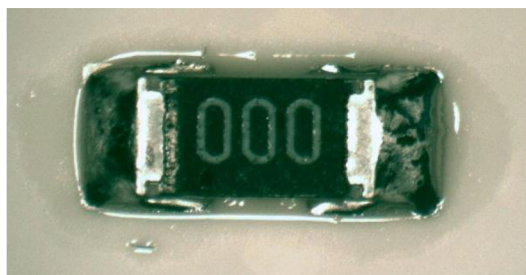
Obr. 18: Zařízení DAGE PC2400.

### 6.3 Vizuální posouzení pájených spojů

Na obrázku 19 je znázorněna součástka o velikosti 1206 zapájená pastou NXG1-HF na vzduchu. Pro srovnání vlivu dusíku je na obrázku 20 uvedena součástka stejné velikosti, zapájená také pastou NXG1-HF, ale při koncentraci kyslíku 1000ppm. Je zde jasně patrná horší smáčivost pasty na vzduchu – pájka není rozteklá až do rohů kontaktních plošek a ani vzniklý spoj není hladký a lesklý jako při koncentraci kyslíku 1000ppm.



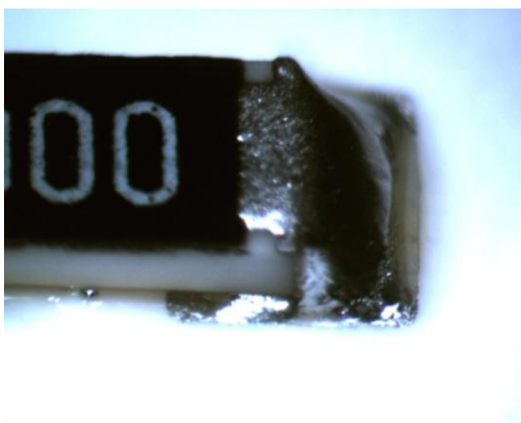
Obr. 19: Zapájená součástka 1206 pastou NXG1 - HF na vzduchu.



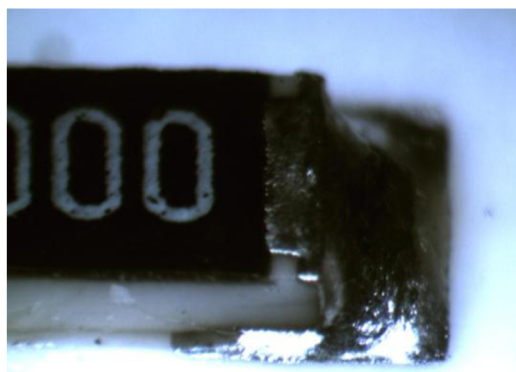
Obr. 20: Zapájená součástka 1206 pastou NXG1 - HF při  $O_2 = 1000\text{ppm}$ .

Na následujících obrázcích jsou znázorněny také součástky velikosti 1206, v tomto případě však byly zapájeny olovnatou pastou R256. Obrázek 21 ukazuje pájení na vzduchu, kde je vidět lesklý spoj, ale pájky bylo velké množství, proto se zdá spoj nedostatečně roztečený. Pájení při  $O_2 = 200\text{ppm}$  dokumentuje obrázek 22. Je vidět lesklý, hladký spoj, kde pájka pokrývá celou kontaktní plošku a typicky navzlínala na kontakt součástky.



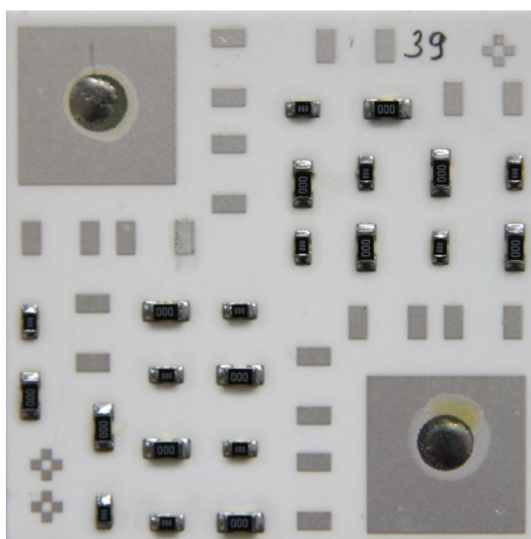


Obr. 21: Zapájená součástka 1206 pastou R256 na vzduchu.

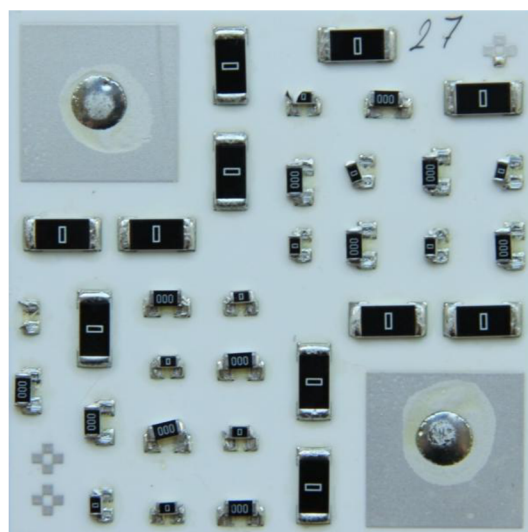


Obr. 22: Zapájená součástka 1206 pastou R256 při  $O_2 = 200\text{ppm}$ .

Obrázky 23 a 24 zobrazují destičky zapájené při  $O_2 = 20\text{ppm}$ . Na obrázku 23 je použita olovnatá pasta R256 a na obrázku 24 bezolovnatá NXG1-HF. Při použití olovnaté pasty je vidět na testovacích plochách více žluté tavidlo, než u bezolovnaté, kde bylo spíše průhledné. Tavidlo v olovnaté pastě je méně rozteklé z důvodu jeho složení a také je ho o 1,7% méně než v bezolovnaté pastě.



Obr. 23: Substrát zapájený pastou R256 při  $O_2 = 20\text{ppm}$ .



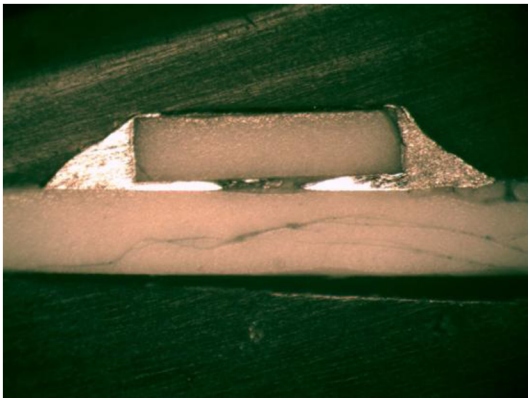
Obr. 24: Substrát zapájený pastou NXG1 - HF při  $O_2 = 20\text{ppm}$ .

Na obrázku 25 jsou uvedeny příklady způsobu utržení součástek z pájecích plošek. Pod každou z uvedených součástek jsou mezi kontaktními ploškami vidět zbytky tavidla.

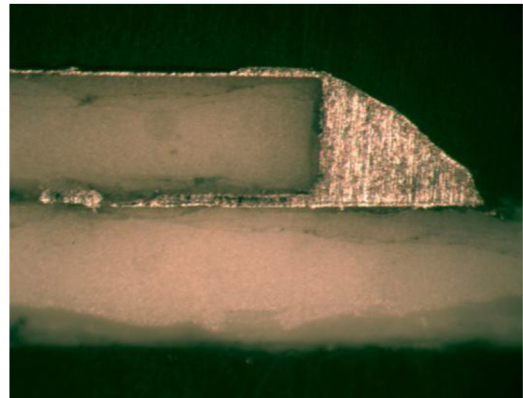


Obr. 25: Příklady způsobů odtrhnutí součástky.

Výbrusy součástek zobrazující tvar a strukturu vzniklého pájeného spoje za použití bezolovnaté pájené pasty NXG1-HF ukazují následující dva obrázky. Na obrázku 26 je součástka zapájená na vzduchu, na obrázku 27 součástka zapájená při  $O_2 = 2000\text{ppm}$ . V případě součástky pájené na vzduchu je vidět větší množství pájky pod samotnou součástkou. Kromě pravého spoje na obrázku 26 je na ostatních dvou spojích vidět přítomnost velkého množství pájky ve spoji.



Obr. 26: Výbrus pájeného spoje: pájka NXG1-HF , vzduch.



Obr. 27: Výbrus pájeného spoje: pájka NXG1-HF ,  $O_2 = 2000\text{ppm}$ .

## 6.4 Naměřené hodnoty pevnosti spojů

V následující části práce jsou uvedeny a popsány získané výsledky pevnosti pájených spojů nejprve pro každou velikost použité součástky zvlášť, poté všechny velikosti dohromady. V grafech jsou zobrazeny i směrodatné odchylky od průměrné hodnoty, které vypovídají o rozptylu naměřených hodnot.

Jsou zde uvedeny jen souhrnné tabulky naměřených hodnot. Kompletní tabulky s výsledkem každé mechanické zkoušky jsou uvedeny v příloze.

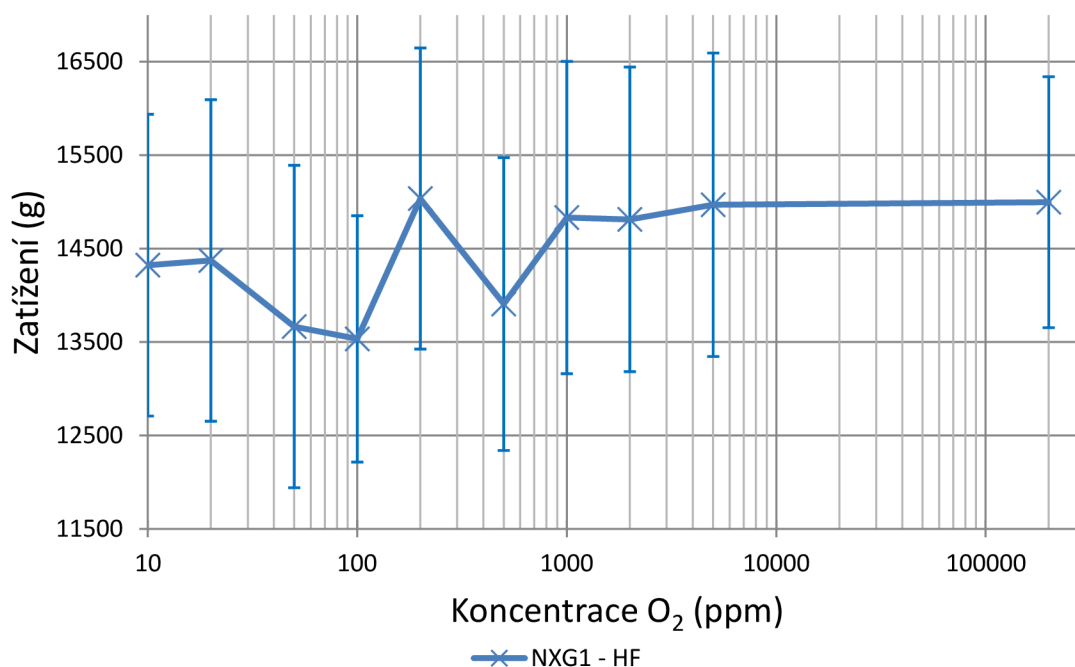
### 6.4.1 Součástky velikosti 2512

Následující tabulka 8 uvádí souhrnné výsledky naměřených hodnot pevnosti pájených spojů při různých koncentracích zbytkového kyslíku. Tyto hodnoty byly následně zpracovány graficky (obr. 28) i s chybovými úsečkami znázorňujícími velikost směrodatné odchylky od vypočítaného průměru.

Tab 8: Pevnost pájených spojů součástky o velikosti 2512.

Součástky velikosti 2512				
Pájka	NXG1 - HF		R256	
Koncentrace O <sub>2</sub>	Průměr	Směrodatná odchylka	Průměr	Směrodatná odchylka
[ppm]	[g]	[g]	[g]	[g]
200000	14996,0	1343,3	Neměřeno	
5000	14968,7	1624,7		
2000	14812,3	1630,8		
1000	14832,0	1671,7		
500	13905,5	1567,5		
200	15035,4	1611,5		
100	13532,4	1319,0		
50	13664,6	1726,2		
20	14372,0	1721,6		
10	14322,0	1615,4		

V následujícím grafu je možné porovnat pevnost pájených spojů při různých koncentracích kyslíku. Pevnost pájeného spoje je přibližně konstantní až do hodnot 1000ppm O<sub>2</sub>. Poté dochází k velkým výkyvům pevnosti spojů na koncentracích 500 a 200ppm O<sub>2</sub>, ale přesto lze pozorovat její pokles. Nejnižší pevnosti dosahuje pasta při 100ppm O<sub>2</sub>. Následně pevnost stoupá až k nejnižší koncentraci 10ppm O<sub>2</sub>, je ovšem stále o téměř 700 gramů nižší než pevnost spoje pájeného bez ochranné atmosféry.



Obr. 28: Graf naměřených pevností pájených spojů pro součástky 2512.

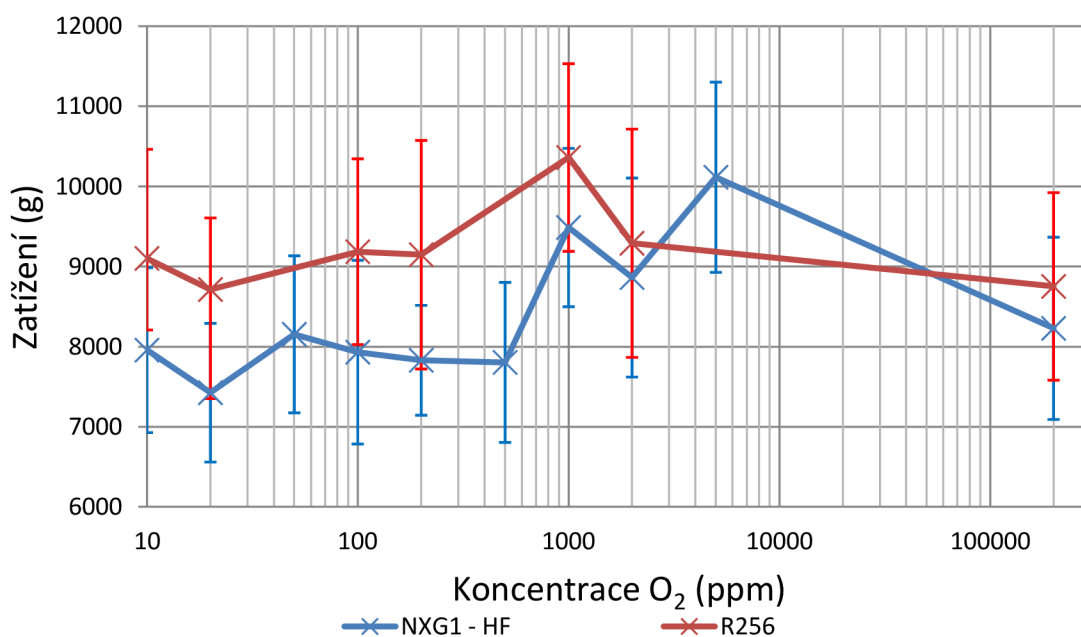
## 6.4.2 Součástky velikosti 1206

V tabulce 9 jsou uvedeny souhrnné výsledky naměřených hodnot pevnosti pájených spojů při různých koncentracích zbytkového kyslíku. Grafická interpretace těchto výsledků je na obrázku 29.

Tab 9: Pevnost pájených spojů součástky o velikosti 1206.

Součástky velikosti 1206				
Pájka	NXG1 - HF		R256	
Koncentrace O <sub>2</sub>	Průměr	Směrodatná odchylka	Průměr	Směrodatná odchylka
[ppm]	[g]	[g]	[g]	[g]
200000	8229,2	1137,1	8752,5	1170,1
5000	10115,0	1186,8	-	-
2000	8863,3	1242,3	9291,2	1424,0
1000	9487,8	987,9	10361,5	1170,8
500	7804,1	998,6	-	-
200	7830,4	685,8	9148,5	1426,3
100	7932,2	1146,5	9185,8	1159,7
50	8154,9	980,1	-	-
20	7426,1	865,3	8713,7	1361,6
10	7957,5	1029,4	9102,1	893,2

Z grafu uvedeného na obrázku 29 je vidět vyšší pevnost olovnaté pájky při každé koncentraci zbytkového kyslíku. Rozdíl pevnosti olovnatého a bezolvnatého spoje se se snižující koncentrací O<sub>2</sub> zvyšuje. Rozdíl v pevnosti se pohybuje od 500g při pájení na vzduchu až k cca 1200g při 10ppm O<sub>2</sub>. Nejnižší pevnost vykazují obě pájky při koncentraci kyslíku 20ppm. Naopak nejvyšší pevnost vykazuje pasta R256 při koncentraci kyslíku 1000ppm, pasta NXG1-HF při 5000ppm.



Obr. 29: Graf naměřených pevností pájených spojů pro součástky 1206.

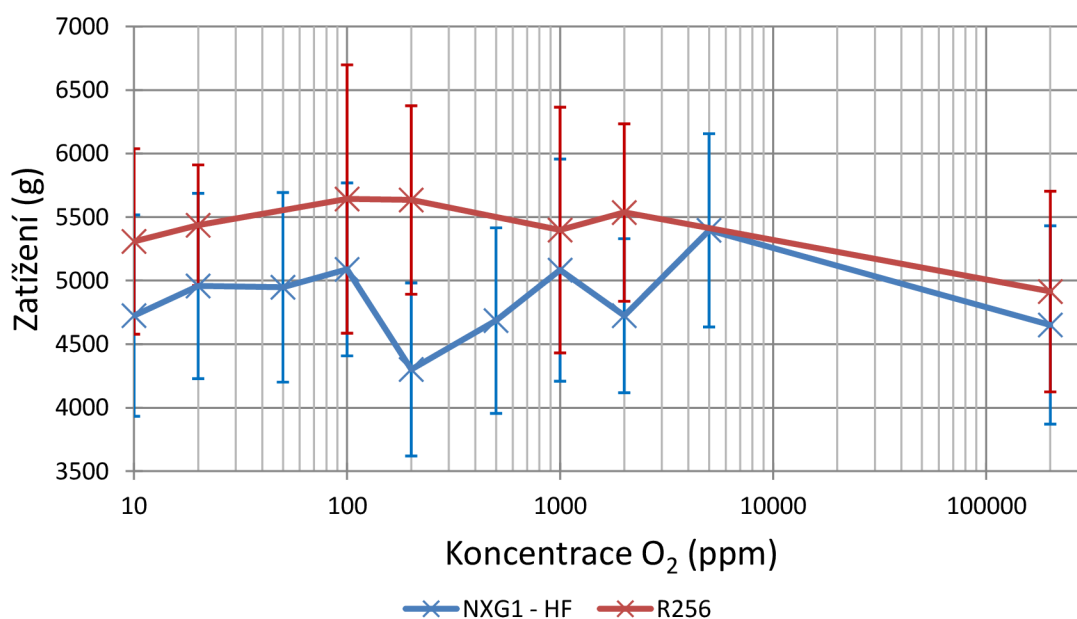
### 6.4.3 Součástky velikosti 0805

V tabulce 10 jsou uvedeny souhrnné výsledky naměřených hodnot pevnosti pájených spojů při různých koncentracích zbytkového kyslíku. Grafické zpracování těchto výsledků je na obrázku 29.

Tab 10: Pevnost pájených spojů součástky o velikosti 0805.

Součástky velikosti 0805				
Pájka	NXG1 - HF		R256	
Koncentrace O <sub>2</sub>	Průměr	Směrodatná odchylka	Průměr	Směrodatná odchylka
[ppm]	[g]	[g]	[g]	[g]
200000	4651,3	780,2	4914,5	789,4
5000	5396,3	760,2	-	-
2000	4724,2	606,4	5536,1	698,0
1000	5082,8	873,9	5398,3	966,7
500	4685,9	730,2	-	-
200	4301,3	680,7	5634,7	741,4
100	5088,7	680,5	5642,2	1055,9
50	4948,0	746,0	-	-
20	4958,3	729,0	5436,1	474,8
10	4725,1	792,0	5308,7	729,5

I pro tuto velikost součástek vykazuje olovnatá pasta R256 vyšší pevnost než bezolovnatá NXG1-HF. Pevnost pasty R256 vykazuje růst s klesající koncentrací kyslíku až k hodnotě 100ppm. Od této hodnoty pevnost spojů klesá, je však stále o 200 gramů vyšší než při pájení bez ochranné atmosféry. Pevnost bezolovnatých spojů je nejnižší při 200ppm O<sub>2</sub>, nejvyšší při 5000ppm O<sub>2</sub>. Kromě hodnoty při 200ppm O<sub>2</sub> je však naměřená pevnost bezolovnaté pasty NXG1-HF vždy vyšší při pájení v ochranné atmosféře než při pájení na vzduchu.



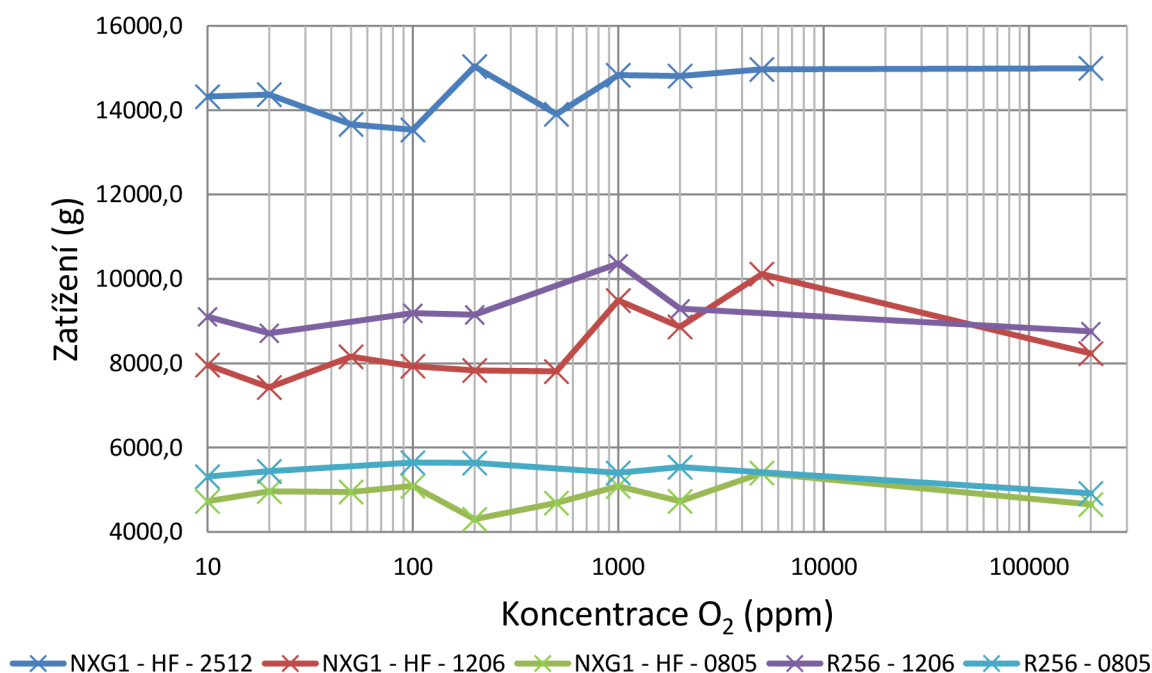
Obr. 30: Graf naměřených pevností pájených spojů pro součástky 0805.



## 6.4.4 Shrnutí výsledků

Pevnost pájených spojů byla testována celkem na 42 destičkách, z toho byly 3 použity pro výbrusy, 7 pro olovnatou pastu (R256) a 30 pro pastu bezolovnatou (NXG1-HF), tj. celkem přes 1000 testovaných pájených spojů. Souhrnné grafické vyjádření naměřených hodnot je uvedeno na obrázku 31.

Vliv ochranné atmosféry na pevnost pájených spojů se různí podle velikosti součástky a také použité pasty. Pro součástky velikosti 2512 je prováděno hodnocení jen pro bezolovnatou pastu NXG1-HF. Ze získaných výsledků lze usuzovat, že použití ochranné atmosféry je kontraproduktivní, protože s klesající koncentrací zbytkového kyslíku klesá také pevnost spoje. Použití ochranné atmosféry u součástek 1206 zapájené bezolovnatou pastou je vhodné do 1000ppm O<sub>2</sub>. Pod touto hranicí je pevnost spoje nižší než při pájení na vzduchu. U pasty R256 vede použití ochranné atmosféry k mírnému zvýšení pevnosti spoje o cca 5%. Při použití součástek 0805 a pasty NXG1-HF má, až na výjimku při 200ppm O<sub>2</sub>, snížení koncentrace kyslíku kladný vliv na pevnost spoje. Tento vliv je nejmenší při koncentracích O<sub>2</sub> 10, 500 a 2000ppm.



Obr. 31: Graf všech naměřených pevností pájených spojů.

Z naměřených hodnot vyplývá, že použití bezolovnaté pasty NXG1-HF pro součástky velikosti 1206 a 0805 je spojeno s nižší odolností spoje na stříh než při použití olovnaté pasty R256.

Rozkmit průměrných hodnot pevnosti spojů v některých částech grafů může být způsoben rozdílným množstvím nanesené pájecí pasty (ruční šablonový tisk). Na vlastnosti pájky má také vliv povrch pájecí plošky. Tím se myslí, zda nebo jak moc je zoxidovaný, jak je drsný nebo hladký. Např. povrch plošek vytvořených sítotiskem na keramice je drsnější než povrch kontaktních plošek na plátované FR-4.

Při testování pevnosti spojů součástek byly zaznamenávány i způsoby, jakými k utržení došlo. Byly rozlišovány 3 druhy:

1. normální utržení – utržení součástky v pájeném spoji,
2. při utržení došlo ke zlomení součástky nebo ulomení rohu součástky,
3. utržení pájecích plošek ze substrátu.

Ke zlomení součástky nebo ulomení rohu došlo v 4,2% (43 případů), k utržení pájecí plošky ze substrátu došlo pouze v 0,1% (1 případ), přičemž se od substrátu odtrhla jen asi 1/3 pájecí plošky.

## 7 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s dostupnou teorií týkající se testování mechanické odolnosti pájeného spoje ve stříhu. V prvních kapitolách bylo popsáno rozdělení bezolovnatých pájek podle použitých příměsí. Nejpoužívanější jsou pájky Sn/Ag/Cu, Sn/Cu, a Sn/Ag. Procentuální zastoupení jednotlivých příměsí ovlivňuje nejen teplotu přetavení pájky a smáčivost pájky, ale také výsledné mechanické vlastnosti. Jelikož pájka je poměrně agresivní vůči DPS a navíc snáze oxiduje, byla rozebrána teorie použití ochranné atmosféry, její výhody a nevýhody. Uvedeno bylo také základní rozdělení tavidel, která jsou nedílnou částí pájecí pasty a významným způsobem ovlivňují kvalitu výsledného spoje. Životnost elektronického zařízení nezáleží jen na kvalitě spoje, ale také na substrátu, který tvoří hlavní nosnou složku DPS. U substrátů bylo popsáno nejen jejich složení, ale také charakteristické vlastnosti. V další části bylo rozebráno, které vlivy ovlivňují životnost pájeného spoje a jakými způsoby lze testovat vytvořené spoje se zaměřením na zkoušku stříhem.

Obsahem praktické části bylo vytvoření motivu pro testování mechanické pevnosti spojů na stříh, který byl umístěn na korundový keramický substrát o rozměrech 50 x 50 mm. Použita byla volně dostupná verze programu Easel 6.3.0. Rozměr pájecích plošek pro kontaktování rezistorů byl automaticky generován programem a mezery mezi jednotlivými součástkami jsou dostatečné pro umístění stříhové hlavy přístroje Dage PC2400, který byl využit k testování mechanických vlastností pájených spojů.

Pro zkoumání pevnosti bezolovnatých pájek byla vybrána pájecí pasta NXG1-HF výrobce Kester se složením Sn99/Ag0,3/Cu0,7. Pevnost spojů byla zkoumána pro koncentraci kyslíku 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 a 200 000 (vzduch) ppm. Jako referenční olovnatá pasta byla zvolena pasta R256 také od výrobce Kester. Tato pasta o složení Sn62/Pb36/Ag2 byla testována při koncentracích kyslíku 10, 20, 100, 200, 1000, 2000 a 200 000 ppm – testovány však byly jen součástky o velikosti 0805 a 1206. Ze získaných dat je zřejmá vyšší pevnost olovnaté pájky pro všechny koncentrace kyslíku. Není ovšem možné popsat směrnici křivky mechanické pevnosti v závislosti na koncentraci kyslíku, ale používat koncentrace nižší než 1000 ppm není nutné, protože pod touto hodnotou pevnost spoje obou past rostla zanedbatelně nebo dokonce klesala. Pevnost spojů byla také pravděpodobně zatížena chybou naneseného množství pájecí pasty ručním šablonovým tiskem.

Na testovacích substrátech jsou také umístěny plochy 15 x 15 mm pro testování roztékavosti pájek. Testování roztékavosti pájky bylo provedeno zároveň s pájením součástek na základní substrát, jejich vyhodnocení však bude z časových důvodů provedeno v další části výzkumných prací.

Bezolovnaté pájky mají, v porovnání s olovnatými, řadu nevýhod. Patří mezi ně vyšší cena, vyšší teplota tavení, užší přetavovací okno a podle výzkumu zpracovaného v této práci také nižší pevnost i při použití ochranné atmosféry. Závěry tohoto výzkumu platí pro vodivý motiv vytvořený na keramice vodivou pastou, pro plátovaný základní materiál (např. plátovaná FR-4) mohou být vlastnosti pájek odlišné.



## Literatura

- [1] SZENDIUCH, Ivan. Problém přechodu na bezolovnaté pájky [online]. [citováno 2012-11-12]. Dostupné z: <<http://www.marpos.cz/leadfree.htm>>.
- [2] RoHS. Neznalost direktivy RoHS se nevyplácí [online]. [citováno 2012-11-12] Dostupné z: <<http://www.rohs.cz/>>.
- [3] STARÝ, Jiří; KAHLE, Petr. Plošné spoje a povrchová montáž [online]. Skriptum. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Dostupné z: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=21618](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=21618)>.
- [4] SZENDIUCH, Ivan. Pájení a bezolovnaté pájky [online]. [citováno 2012-11-13]. Dostupné z: <<http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>>.
- [5] Abtev, Mulugeta. Lead-free soldem in microelectronics [online]. [citováno 2012-11-14] Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0927796X00000103>>.
- [6] MIRIC, A. Z.; GRUSD, Angela. Lead – free alloys [online]. [citováno 2012-11-14]. Dostupné z: <[http://tersted.home.xs4all.nl/PDF\\_files/Heraeus/AM\\_AG\\_PBFREE.pdf](http://tersted.home.xs4all.nl/PDF_files/Heraeus/AM_AG_PBFREE.pdf)>.
- [7] SMT centrum. Srovnání pájecích slitin SAC a SN100 [online]. Vydáno 31. 12. 2009 [citováno 2012-11-14]. Dostupné z: <<http://www.smtcentrum.cz/vyber-pajecich-slitin/srovnani-pajecich-slitin-sac-a-sn100/>>.
- [8] SZENDIUCH, I.; PÍCHA, J.; JANKOVSKÝ, J.; BURŠÍK, M.; ŘEZNÍČEK, M.; ADÁMEK M. Pájení přetavením v elektrotechnice – fenomén doby. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. 40 s. ISBN 978-80-214-4233-7.
- [9] STARÝ, J.; ZATLOUKAL, M.; STEJSKAL, P. Montážní a propojovací technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. [skripta] Nedatováno. 262 s.
- [10] SZENDIUCH, Ivan. Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. 1. vyd. VITUM, 2006. ISBN 80-214-3292-6.
- [11] Szendiuch, I. Učební text k předmětu BMTS – Mikroelektronika a technologie součástek. [online]. Dostupné z: <[www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9%20vrstvy\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9%20vrstvy(Bc).pdf)>.
- [12] AMALU, E. H. A study of SnAgCu solder paste transfer efficiency and effects of optimal reflow profile on solder deposits [online]. [citováno 2012-11-26]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0167931711002310>>.

- [13] IMST GmbH. LTCC [online]. Vydáno květen 2012. [citováno 2012 – 11 - 30]. Dostupné z: <<http://www.ltcc.de/en/whatis.php>>.
- [14] Bienert Christian. Characterization and improvement of LTCC composite materials for application at elevated temperatures [online]. [citováno 2012 – 11 – 30]. Dostupné z <<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0955221909002568>>.
- [15] DUSEK, Miloš.; HUNT, Christopher. Crack detection methods for lead - free solder joints [online]. 3/2004, [citováno 2011-11-21]. Dostupné z: <[http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/matc164.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/matc164.pdf)>.
- [16] LIPA VSKÝ, L. Porovnání vlastností pájených spojů na keramických substrátech pomocí zkoušky stříhem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 53 s.
- [17] ENTEGGART, Ian. The role of micromechanical testing in microelectronics [online]. [citováno 2011-12-14]. Dostupné z: <<http://www.instron.com/wa/library/StreamFile.aspx?doc=47>>.
- [18] ČSN EN 62137 - 1 - 2. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje - část 1 - 2: Zkouška pevnosti ve smyku. 2008.
- [19] ŠULA, M. Vizuální porovnání bezolovnatých spojů pro různé materiálové kombinace. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 62 s.
- [20] Kester connecting innovation, R256 No-Clean Solderpaste [online].[citováno 2012–12–12]. Dostupné z: <<http://www.3s-technologies.com.tr/joomla/images/pdf/R256.pdf>>.
- [21] Kester connecting innovation, Lead-Free No-Clean Solder Paste[online].[citováno 2012–12–12]. Dostupné z: <[http://www.dico-electronic.de/de/produkte/loetmittel/lotpasten\\_bleifrei/pdf/NXG1-HF-Global-10Mar09\\_DICO.pdf](http://www.dico-electronic.de/de/produkte/loetmittel/lotpasten_bleifrei/pdf/NXG1-HF-Global-10Mar09_DICO.pdf)>.

## Seznam použitých zkratek

BGA – typ pouzdra (Ball Grid Array)

DPS – Deska plošných spojů

FR-4 – typ základního materiálu

ppm – Parts per million - výraz pro jednu miliontinu

QFP – Quad Flat Package

RMA – pryskyřičné mírně aktivované tavidlo

SMD – součástka pro povrchovou montáž (Surface-Mount Device)

SMT – technologie povrchové montáže (Surface – Mount Technology)

TCE – Teplotní součinitel délkové roztažnosti (Thermal Coefficient of Expansion)

ZM – Základní materiál

# Příloha 1: Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů

Tab 11: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 200 000ppm.

Koncentrace O2 (ppm)	200000				
Pasta	NXG1 - HF				R256
Velikost součástky	Zatížení (g)				
0805	-	-	-	4725	5170
	5111	4776	4685	4569	4802
	-	-	-	4271	4570
	-	-	-	4094	5526
	-	-	-	3985	5041
	4643	4976	4402	3326	4352
	4188	5033	5851	3973	4334
	4919	4520	4030	4480	5255
	3813	6550	6122	6261	6658
	3356	5188	4936	4078	3566
	-	-	-	4028	4785
Průměr	4651,3				4914,5
Směrodatná odchylka	780,2				789,4
1206	6891	9012	10508	7043	11248
	-	-	-	7635	8258
	-	-	-	7556	7477
	8552	10108	9819	7886	8633
	-	-	-	7545	8946
	7500	6926	7515	7849	8502
	8384	9691	9403	8430	9560
	-	-	-	7677	8749
	9325	9061	10510	6701	7234
	6874	7605	8318	6827	7716
	-	-	-	7495	9955
Průměr	8229,2				8752,5
Směrodatná odchylka	1137,1				1170,1
2512	-	-	-	12955	Neosazeno
	-	-	-	13532	
	-	-	-	15242	
	-	-	-	15200	
	-	-	-	14737	
	-	-	-	16162	
	13527	15753	13536	11621	
	15615	15899	16517	15295	
	16401	15466	15259	14835	
	16115	16986	16386	12905	
	-	-	-	14964	
Průměr	14996,0				-
Směrodatná odchylka	1343,3				-

Tab 12: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 5000ppm.

Koncentrace O2 (ppm)	5000			
Pasta	NXG1 - HF		R256	
Velikost součástky	Zatížení (g)			
0805	-	-	-	Neosazeno
	3959	5448	5956	
	-	-	-	
	-	-	-	
	4270	5949	5103	
	5430	5735	4911	
	5766	5744	5021	
	7042	-	6270	
	4407	-	5329	
	-	-	-	
Průměr	5396,3			-
Směrodatná odchylka	760,2			-
1206	10357	9328	11194	Neosazeno
	-	-	-	
	-	-	-	
	8663	8858	10351	
	-	-	-	
	8584	9906	11054	
	10815	10156	11013	
	-	-	-	
	12262	-	11762	
	9615	-	7922	
-	-	-		
Průměr	10115,0			-
Směrodatná odchylka	1186,8			-
2512	-	-	-	Neosazeno
	-	-	-	
	-	-	-	
	-	-	-	
	-	-	-	
	-	-	-	
	13189	16113	11762	
	14040	15383	13383	
	13829	16623	16408	
	16821	15157	16916	
-	-	-		
Průměr	14968,7			-
Směrodatná odchylka	1624,7			-

Tab 13: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 2000ppm.

Koncentrace O2 (ppm)	2000			
Pasta	NXG1 - HF			R256
Velikost součástky	Zatížení (g)			
0805	4724	5631	5235	6429
	5239	5194	5163	5901
	4892	4364	4954	5966
	4663	3901	4065	4658
	5102	5590	3919	6066
	5448	5299	3821	5710
	4551	4808	3594	4796
	4486	5705	4244	5121
	5120	5441	4409	6139
	3923	4687	4889	4304
	5049	4312	3477	5807
Průměr	4724,2			5536,1
Směrodatná odchylka	606,4			698,0
1206	11225	8361	8079	12471
	9769	9860	9048	8464
	9149	7634	8531	9041
	10136	9717	10315	9060
	8839	8916	8260	9544
	8110	12077	7905	8033
	10726	7544	9574	8605
	8504	7072	8857	10633
	8656	9692	9265	10328
	5868	8116	9064	8754
	6803	8656	8160	7270
Průměr	8863,3			9291,2
Směrodatná odchylka	1242,3			1424,0
2512	15016	14057	16226	Neosazeno
	12610	12998	12332	
	16803	13834	14185	
	15742	15841	15260	
	15749	16363	14784	
	13086	15716	17184	
	14796	17131	12979	
	17418	16352	14053	
	14534	14171	13202	
	16150	16089	15879	
	10152	14991	13124	
Průměr	14812,3			-
Směrodatná odchylka	1630,8			-

Tab 14: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 1000ppm.

Koncentrace O2 (ppm)	1000			
Pasta	NXG1 - HF			R256
Velikost součástky	Zatížení (g)			
0805		5132	5819	6753
	5755	4523	5186	5733
		5384	5127	5389
		3591	5105	5232
		4266	4802	6579
	4174	3923	6613	5227
	4548	4669	4728	6476
	5240	4131	6508	4167
	6436	6488	6011	5533
	5.583	5617	5477	3907
		3406	4577	4385
Průměr	5082,8			5398,3
Směrodatná odchylka	873,9			966,7
1206	10889	9227	8413	9814
		8290	8648	9619
		7874	8392	10571
	10972	8875	10016	11112
		10139	10373	10092
	9127	9989	10429	11154
	9077	9419	9789	10889
		8005	8333	11301
	9776	11601	9892	12168
	9015	8360	10281	9376
		9477	10981	7881
Průměr	9487,8			10361,5
Směrodatná odchylka	987,9			1170,8
2512	-	13905	12084	Neosazeno
	-	11738	12752	
	-	15462	15352	
	-	14002	15312	
	-	15389	14432	
	-	17151	18644	
	15379	13077	14608	
	15965	15864	15766	
	13726	15321	14796	
	15832	16609	17240	
	-	12129	13097	
Průměr	14832,0			-
Směrodatná odchylka	1671,7			-

Tab 15: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 500ppm.

Koncentrace O2 (ppm)	500			
Pasta	NXG1 - HF			R256
Velikost součástky	Zatížení (g)			
805	6480	4887	4965	Neosazeno
	5210	5179	4086	
	5130	4040	4622	
	3758	3990	4167	
	4251	3949	4039	
	4850	4920	3848	
	4755	5357	5142	
	4355	5126	3383	
	4395	6872	5655	
	4880	3901	4724	
	4690	4641	4388	
Průměr	7415,4			-
Směrodatná odchylka	1416,3			-
1206	7532	8555	8822	Neosazeno
	8067	6060	8371	
	8321	7239	6191	
	7358	8807	9788	
	8129	7701	6829	
	8971	8383	7752	
	9062	8110	7740	
	8493	6381	6858	
	9045	9579	7530	
	7045	7461	7863	
	5744	7186	6563	
Průměr	11155,4			-
Směrodatná odchylka	2728,4			-
2512	14512	14855	11625	Neosazeno
	11327	10972	12235	
	15639	16451	13440	
	15606	14569	13103	
	16105	13154	12889	
	15391	13226	15151	
	14894	15165	16404	
	14933	12765	11661	
	13921	14547	15465	
	14292	14014	12723	
	11148	14656	12044	
Průměr	13659,4			-
Směrodatná odchylka	1745,1			-



Tab 16: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 200ppm.

Koncentrace O2 (ppm)	200			
Pasta	NXG1 - HF			R256
Velikost součástky	Zatížení (g)			
805	4545	5692	5435	6908
	4155	5209	5385	6388
	3556	5152	5159	5352
	3518	3302	4360	5251
	3870	4140	4529	5101
	4525	3728	5201	5233
	4264	4657	6877	5404
	3439	3438	5097	5402
	5732	4632	6285	6680
	4321	4044	5380	4450
	4471	4238	4691	5813
Průměr	7801,9			5634,7
Směrodatná odchylka	1341,3			741,4
1206	8434	8167	7752	11670
	7982	9274	8180	8910
	8051	7574	7586	7156
	7445	7552	9024	9246
	6657	8064	9185	8642
	7733	7049	8930	9340
	6765	7450	8829	10426
	8060	8642	8248	9866
	8690	8534	7845	10212
	7416	6769	7240	8441
	7347	8613	6844	6724
Průměr	12454,4			9148,5
Směrodatná odchylka	3805,9			1426,3
2512	15714	14305	13098	Neosazeno
	13992	12570	10877	
	15206	13989	16177	
	16183	15632	17683	
	14782	14511	18239	
	14558	16152	15102	
	16582	16566	16751	
	14110	16911	17069	
	12597	16434	15275	
	13735	15648	12908	
	13595	14854	14364	
Průměr	15678,0			-
Směrodatná odchylka	1273,1			-

Tab 17: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 100ppm.

Koncentrace O2 (ppm)	100			
Pasta	NXG1 - HF			R256
Velikost součástky	Zatížení (g)			
805	5666	3798	6592	7232
	5755	5441	4960	6726
	5273	4466	6288	6242
	4528	4944	5025	5559
	5261	5451	4987	6077
	4911	4327	5914	4982
	6010	4266	4888	4316
	5061	4874	5571	4195
	5523	3342	5799	6892
	5420	4748	4721	4899
	4679	4282	5160	4944
Průměr	5158,9			5642,2
Směrodatná odchylka	781,5			1055,9
1206	7797	8679	7606	10489
	chyba	9716	8254	10346
	chyba	8063	8460	8079
	7958	7524	9964	10154
	8208	8192	7526	10377
	10320	7692	7939	9564
	7623	6303	8625	8074
	7708	6179	9077	8915
	10201	5530	8344	7702
	7037	5880	7472	9821
	6973	8192	6856	7523
Průměr	8116,2			9185,8
Směrodatná odchylka	1827,3			1159,7
2512	13372	13797	Neosazeno	Neosazeno
	12122	12323		
	14064	14045		
	14559	14501		
	12980	13052		
	13085	10115		
	13939	15722		
	13003	14686		
	15683	13952		
	14660	13952		
	13181	10919		
Průměr	10858,3		-	-
Směrodatná odchylka	4009,5		-	-

Tab 18: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 50ppm.

Koncentrace O2 (ppm)	50			
Pasta	NXG1 - HF			R256
Velikost součástky	Zatížení (g)			
805	5356	5160	5443	Neosazeno
	6057	4956	5198	
	5055	3652	4642	
	5042	3953	4895	
	5083	3648	5365	
	4920	3939	5024	
	5924	5919	5933	
	5361	4300	4974	
	6989	4477	5384	
	4883	3986	4712	
	4863	3625	4567	
Průměr	5265,3			-
Směrodatná odchylka	1842,7			-
1206	8634	10938	9137	Neosazeno
	8726	8261	7683	
	6704	7847	6884	
	7811	7872	7420	
	7967	8476	10248	
	7310	8736	8498	
	8936	8509	6986	
	7637	9114	9877	
	7636	7935	8948	
	8307	7262	6863	
	7073	7258	7618	
Průměr	8114,8			-
Směrodatná odchylka	924,2			-
2512	12916	11130	Neosazeno	Neosazeno
	11945	10698		
	12742	14948		
	14494	16754		
	16237	12769		
	14960	13640		
	15249	14103		
	14083	12256		
	15330	16235		
	13031	10505		
	13092	13504		
Průměr	13303,8			-
Směrodatná odchylka	2113,9			-

Tab 19: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 20ppm.

Koncentrace O2 (ppm)	20			
Pasta	NXG1 - HF			R256
Velikost součástky	Zatížení (g)			
805	5552	5744	5177	5721
	4273	4635	4680	6183
	3726	5776	5542	5549
	3163	5157	4971	5138
	3722	5599	5443	5352
	4001	4473	5796	5192
	5721	5043	4969	6319
	4535	5694	5939	5199
	4602	4948	6381	5314
	4564	5391	4947	5079
	3897	5001	4562	4751
Průměr	4958,3			5436,1
Směrodatná odchylka	729,0			474,8
1206	8185	8418	6974	9581
	7453	8570	7507	9743
	7609	6574	6665	8101
	6935	7224	7275	7179
	7501	7619	7638	6730
	8699	7538	7007	6848
	9792	6773	6698	8874
	5394	8288	7529	10413
	8303	6256	8127	10445
	7764	5894	6842	9488
	8192	7133	6686	8449
Průměr	7426,1			8713,7
Směrodatná odchylka	865,3			1361,6
2512	13547	Neosazeno	Neosazeno	Neosazeno
	11399			
	17275			
	13713			
	13975			
	16091			
	12351			
	15367			
	15956			
	15527			
	12891			
Průměr	14372,0			-
Směrodatná odchylka	1721,6			-

Tab 20: Hodnoty pevnosti pájených spojů pro koncentraci kyslíku 10ppm.

Koncentrace O2 (ppm)	10			
Pasta	NXG1 - HF			R256
Velikost součástky	Zatížení (g)			
805	5039	4238	5662	4338
	4495	5097	6971	5591
	4294	3914	5855	5617
	4047	3631	5085	5154
	4098	3848	4671	5730
	4677	4336	6001	5555
	4890	4287	5607	6007
	4439	4011	4604	3957
	5543	5358	5905	4734
	3500	4041	4909	6447
	3986	3885	5005	5266
Průměr	4725,1			5308,7
Směrodatná odchylka	792,0			729,5
1206	7067	9813	9961	11274
	7711	8995	8704	9072
	7042	7446	6748	8329
	6901	8959	7141	8517
	8452	8789	8384	9751
	7251	9134	7326	8824
	9114	7001	6288	9525
	8933	8405	8491	9058
	9887	7805	8128	7978
	7639	7114	6527	8514
	6282	7775	7385	9281
Průměr	7957,5			9102,1
Směrodatná odchylka	1029,4			893,2
2512	14570	14115	Neosazeno	Neosazeno
	10284	13282		
	14136	15752		
	13025	13767		
	14456	15537		
	15813	10490		
	16439	14446		
	16211	16615		
	15269	13411		
	15083	15075		
	14077	13231		
Průměr	14322,0		-	-
Směrodatná odchylka	1615,4		-	-