

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vliv množství bezolovnaté pájecí slitiny na mechanickou  
pevnost pájených spojů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej DUNOVSKÝ**  
Osobní číslo: **E13B0109P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Vliv množství bezolovnaté pájecí slitiny na mechanickou pevnost pájených spojů**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou měkkého pájení a měření mechanické pevnosti spojů.
2. Vypracujte přehled používaných zkoušek mechanických vlastností pájeného spoje.
3. Navrhněte a proveďte experiment měření mechanické pevnosti pájeného spoje v závislosti na množství bezolovnaté pájecí slitiny SAC.
4. Proveďte vyhodnocení získaných dat a doporučení optimálního množství pájecí slitiny SAC pro testovaný typ spoje.

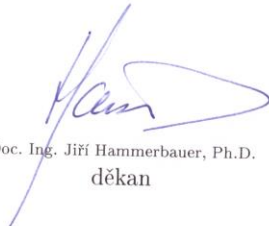


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

1. P. Mach, V. Skočil, J. Urbánek Montáž v elektronice
2. R. J. Klein Wassink Soldering in electronics
3. M. Abel, V. Cimburek Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi
4. Normy ČSN EN 62137-1-2 a IEC 62137-3
5. Internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Hirman**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá technologií měkkého pájení. Teoretická část práce rozebírá problematiku bezolovnatého pájení v elektrotechnice, základní metody pájení, přehled nejvyužívanějších bezolovnatých pájecích slitin a v neposlední řadě jsou zde popsány mechanické zkoušky, kterými se testuje pevnost pájeného spoje. V praktické části je popsáno testování mechanické pevnosti pájených spojů, které bylo realizováno pomocí mechanické zkoušky smykem.

## **Klíčová slova**

Měkké pájení, pájitelnost, pájecí slitina, pájený spoj, mechanická pevnost, spolehlivost, životnost, DPS

## **Abstract**

This thesis deals with the technology of soldering. The theoretical part is focused on the lead-free soldering in electrical engineering. Basic methods of soldering, types of the most frequently used lead-free solder alloys, and mechanical strength tests of the solder joints are described in the study. The practical part focuses on the testing of the mechanical strength of solder joints by the shear test method.

## **Key words**

Soft soldering, solderability, solder alloy, solder joint, mechanical strength, reliability, service life, DPS

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 26.5.2016

Ondřej Dunovský

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Hirmanovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ TEORIE MĚKKÉHO PÁJENÍ V ELEKTROTECHNICE</b> .....	<b>11</b>
1.1 BEZOLOVNATÉ PÁJENÍ V ELEKTROTECHNICE .....	12
1.2 PÁJECÍ TAVIDLA .....	13
1.3 BEZOLOVNATÉ PÁJECÍ SLITINY .....	14
1.3.1 Sn/Ag .....	16
1.3.2 Sn/Cu .....	16
1.3.3 Sn/Ag/Cu.....	16
1.3.4 Sn/Ag/Cu/X .....	17
1.3.5 Sn/Ag/Bi/X .....	17
1.3.6 Sn/Zn/X .....	17
1.3.7 Sn/Sb.....	17
1.3.8 Sn/Bi .....	18
1.4 METODY PÁJENÍ.....	18
1.4.1 Ruční pájení.....	19
1.4.2 Pájení vlnou.....	20
1.4.3 Pájení přetavením.....	21
1.5 ŽIVOTNOST A SPOLEHLIVOST PÁJENÉHO SPOJE .....	23
1.5.1 Životnost pájeného spoje .....	23
1.5.2 Spolehlivost pájeného spoje.....	24
1.6 PÁJITELNOST.....	26
<b>2 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PÁJENÉHO SPOJE</b> .....	<b>29</b>
2.1 MECHANICKÁ ÚNAVOVÁ ZKOUŠKA SMYKEM.....	29
2.2 ZKOUŠKA TAHEM.....	30
2.3 ZKOUŠKA STRÍHEM .....	31
2.4 ZKOUŠKA ODOLNOSTI PROTI ODTRŽENÍ .....	33
2.5 ZKOUŠKA CYKlickÝM PADÁNÍM .....	33
2.6 ZKOUŠKA CYKlickÝM OHYBEM .....	34
<b>3 PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>36</b>
3.1 ÚVOD MĚŘENÍ.....	36
3.2 POUŽITÉ MATERIÁLY A POSTUPY MĚŘENÍ .....	36
3.2.1 Pájecí slitiny .....	37
3.2.2 SMD součástky .....	38
3.2.3 Pájecí profily .....	38
3.3 MECHANICKÁ ZKOUŠKA SMYKEM.....	39
3.4 NAMĚŘENÉ HODNOTY .....	41
3.5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	42
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>45</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>46</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK</b> .....	<b>49</b>



## Seznam symbolů a zkratk

BGA.....	Ball Grid Array (typ pouzdra integrovaného obvodu)
ČSN .....	Česká technická norma
ČSN EN .....	Převzatá Evropská technická norma
DPS.....	Deska plošných spojů
PBB.....	Polybromovaný bifenyln
PBDE.....	Polybromovaný difenylether
PWB .....	Printed Wiring Board (typ desky plošných spojů)
QFP.....	Quad Flat Package (typ pouzdra integrovaného obvodu)
RoHS .....	Restriction of Hazardous Substances (směrnice Evropského společenství)
SAC .....	Označení pro slitiny složené z cínu, stříbra, mědi
SMD .....	Surface Mount Device (součástka pro povrchovou montáž plošných spojů)
SOIC.....	Small Outline Integrated Circuit (typ pouzdra integrovaného obvodu)
TSOP .....	Thin Small Outline Package (typ pouzdra integrovaného obvodu)
WEEE.....	Waste from Electrical and Electronic Equipment (směrnice odpadového hospodářství)
$\Omega$ .....	Ohm
F.....	Síla
$F_{\max}$ .....	Maximální síla
N.....	Newton

## Úvod

V závěrečné práci svého bakalářského studia se zabývám problematikou vlivu množství bezolovnaté pájecí slitiny na mechanickou pevnost pájených spojů. Žijeme v době elektroniky, bez které si již život dovedeme jen stěží představit, doslova nás obklopuje na každém kroku. Navíc trend dnešní doby je takový, že dochází k neustálému zmenšování rozměrů elektronických zařízení, a tedy i součástek uvnitř těchto zařízení. To však klade větší nároky na technologie, které umožňují jednotlivé součástky vzájemně vodivě propojit tak, aby zařízení pracovala správně.

Stejně jako v ostatních technologických odvětvích i technologie pájení elektronických zařízení prošla svým vývojem. Od padesátých let devatenáctého století, kdy byly součástky připevněny na prkénka pouze pomocí kovových pásků, až po současné automatické pájecí postupy.

Samotná bakalářská práce je rozdělena do tří kapitol. První kapitola se převážně zabývá pájecími slitinami a požadavky, které jsou na pájené spoje kladeny. Dále jsou zde uvedeny parametry, které vypovídají o kvalitě pájeného spoje, a také jsou zde rozvedeny základní metody pájení.

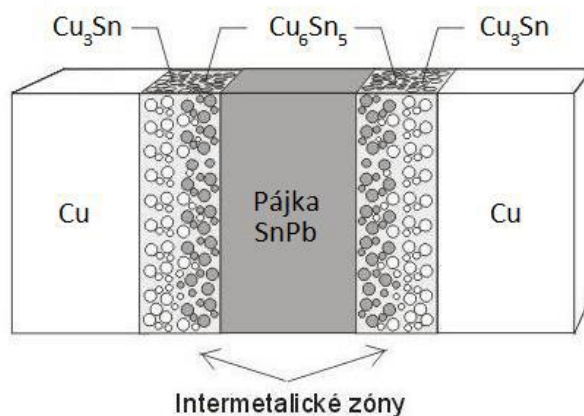
Druhá kapitola je zaměřena na zkoušky charakterizující mechanické vlastnosti pájeného spoje, které znázorňují deformaci pájky v závislosti na čase.

Poslední kapitola práce je věnována praktickému testování mechanické pevnosti pájených spojů. Testování hodnotí, jaký vliv má různé množství bezolovnaté pájecí slitiny, nanesené na DPS, na mechanickou pevnost pájeného spoje. Cílem praktické části této bakalářské práce bylo navrhnout a provést experiment měření mechanické pevnosti pájených spojů a následně doporučit optimální množství pájecí slitiny.

## 1 Základní teorie měkkého pájení v elektrotechnice

Pájení je způsob, kdy se metalurgickou cestou působením vhodného zdroje tepla spojují stejné nebo různé kovové materiály pomocí dalšího roztaveného kovu (tzv. pájky). Ten má zpravidla jiné chemické složení a nižší teplotu tavení, než jsou teploty tavení spojovaných částí. Podle teploty tavení pájecí slitiny lze rozdělit pájení na měkké a tvrdé. Pro montážní práce v elektronice se užívá měkké pájení, které charakterizují teploty tavení do 500 °C. Za tvrdé se považuje takové pájení, při kterém je teplota tavení pájky vyšší než 500 °C. [1]

Tvorba pájeného spoje probíhá na rozhraní mezi pájeným předmětem a pájkou. Celý proces pájení je přitom doprovázen složitými fyzikálně – chemickými pochody na rozhraní tuhé a tekuté fáze. [2] Předpokladem pro vznik účinku adhezních (adheze = přilnavost) a kohezních (koheze = soudržnost) sil je styk povrchových atomů základního materiálu a atomů roztavené pájky v určité požadované vzdálenosti. Současně dochází k rozpouštění a difúzi některých prvků spojovaných materiálů. V důsledku toho se vytváří rozhraní mezi pevným a tekutým kovem. V převážné většině případů vznikají přechodové oblasti, které mají určitou tloušťku a disponují odlišnými mechanickými, chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Tyto oblasti se nazývají intermetalické zóny a jsou tvořeny intermetalickými sloučeninami (viz Obr. 1.1). [1]



Obr. 1.1 Pájený spoj [1]

## 1.1 Bezolovnaté pájení v elektrotechnice

Zákaz používání olova v elektrotechnických výrobcích je velmi úzce spjat s ochranou životního prostředí. Olovo totiž nelze z vyřazených elektronických přístrojů recyklovat. Dostanou-li se desky plošných spojů na skládky, těžký kov se snadno vyluhuje do podloží a hrozí kontaminace spodních i povrchových vod. Vnikne-li následně olovo do lidského těla, způsobuje vážná onemocnění. [1]

Svět však rok od roku spotřebovává více a více elektronických přístrojů a tím pádem narůstá také objem elektronického odpadu, který obsahuje již zmíněné olovo a jiné těžké kovy, které poté mohou být vyluhovány do vodního zdroje. Proto musela být zavedena vhodná opatření, která by řešila, jak tento odpad bezpečně likvidovat, recyklovat a celkově omezovat. V únoru roku 2003 vstoupila v platnost směrnice Evropského společenství RoHS (Restriction of Hazardous Substances) vztahující se k ochraně životního prostředí. Tato směrnice byla dále v roce 2006 novelizována, přičemž novela omezuje používání šesti nebezpečných látek v elektrotechnických a elektronických výrobcích. Jedná se o následující nebezpečné látky:

- Rtuť,
- Kadmium,
- Olovo,
- Šestimocný chrom,
- Materiály snižující hořlavost PBB a PBDE.

Směrnice RoHS je velmi úzce svázána se směrnicí WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment) Evropského společenství, známé jako směrnice odpadového hospodářství. Hlavním účelem směrnic RoHS a WEEE je omezit odpady elektrotechnického a elektronického charakteru a tím zamezit nebezpečí znečištění životního prostředí. Ve světě je náhrada bezolovnatých pájek řešena na kontinentálních úrovních. Z celosvětového hlediska bude také velmi důležité to, jaký postoj k bezolovnatému pájení zaujme jeden z největších světových producentů elektrotechnických výrobků – Čína. Většina firem musela přejít na pájení bezolovnatými slitinami z důvodu toho, že olovnaté pájky se staly až na výjimky zakázané. Všeobecně

však bude zájem firem o přechod na bezolovnaté pájení nepochybně rychle stoupat také z důvodu získání konkurenčních výhod u výrobků, které nezatěžují životní prostředí (green product). Statisticky byl totiž zjištěn v posledních letech jejich zvýšený prodej o 10-20% v porovnání s ostatními (neekologickými) produkty. [1], [3]

## 1.2 Pájecí tavidla

Jsou chemické látky, které mají za úkol podpořit smáčení a působit jako čisticí prostředek při tvrdém či měkkém pájení s cílem redukovat oxidační vrstvy na pájeném povrchu. Ideální tavidlo by mělo být vysoce aktivní za pájecích teplot a nečinné za normálních teplot pracovního zařízení, aby nebylo nutné odstraňovat jej po pájení. [1], [4] Samotná tavidla se skládají ze čtyř hlavních složek:

- **Tavidlový nosič** – Většinou se jedná o přírodní nebo syntetické pryskyřice nebo organické kyseliny.
- **Aktivátor** – Při nižších teplotách relativně nečinný, při zvýšení teploty začíná být aktivní a odstraňuje oxidy kovu, oleje a jiné nečistoty z pájeného povrchu. Tyto vlastnosti zajišťují různé kyseliny buď na organické nebo anorganické bázi, případně halogenidy.
- **Aditiva** – Jedná se o látky, které upravují fyzikální vlastnosti tavidla (rheologické modifikátory, stabilizátory pěny, antishlukovací činidla).
- **Rozpouštědla** – chemikálie, které udržují tavidlo v potřebném skupenství, rozpouští pevná tavidla (kalafunu) na pastu, při kontaktu se vzduchem se vypařují a zhoršují tak vlastnosti pájené slitiny (v případě pasty). Rozpouštědla mohou být na organické bázi (alkoholy) nebo anorganické bázi (demineralizovaná voda). [4]

Tavidla lze klasifikovat dle následující tabulky:

Tab. 1.1 Klasifikace tavidel dle ČSN EN ISO 29454-1 [1]

Typ tavidla	Základ tavidla	Aktivace tavidla
1. Pryskyřičná	1. Kalafuna	1. Bez aktivátorů
	2. Nekalafunovaná pryskyřice	2. Halogeny
		3. Nehalogenové aktivátory
2. Organická	1. Vodou ředitelná	1. Bez aktivátorů
	2. Vodou neředitelná	2. Halogeny
		3. Nehalogenové aktivátory

<b>3. Anorganická</b>	1. Soli	1. S chloridem amonným
		2. Bez chloridu amonného
	2. Kyseliny	1. Kyselina fosforečná
		2. Jiná kyselina
	3. Alkálie	1. Aminy nebo amoniak

Za účinnost tavidla lze považovat míru schopnosti podpořit smáčivost povrchů určených k pájení. Účinnost tavidla se určuje podle schopnosti kombinovat jeho *aktivitu* (základní vlastnost čistit povrchy) a jeho *stabilitu* (čas, během kterého udržuje aktivitu za pájecích teplot). Výběr vhodného tavidla poté převážně závisí na způsobu nanášení, výběru pájecí technologie a pájecí slitiny. [1]

### 1.3 Bezolovnaté pájecí slitiny

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1 této bakalářské práce, snaha celého světa směřuje k co možná největšímu omezení používání olova v elektrotechnickém průmyslu. Jako alternativa za používání olovnatých slitin se nabízí používání slitin bezolovnatých. Tento fakt však s sebou přináší řadu nových, velmi podstatných změn a zásahů do samotných technologických procesů. Bezolovnaté pájecí slitiny však ve srovnání s olovnatými mají v mnoha ohledech méně příznivé vlastnosti při technologii pájení, např. dosahují vyšší teploty tavení, mají horší mechanické vlastnosti výsledného spoje, anebo co se týče ceny, jsou dražší. [5]

V následující tabulce lze vidět přehled bezolovnatých pájecích slitin, které se nabízejí jako náhrada za olovnaté pájecí slitiny, primárně rozdělených dle teploty tavení. Dále jsou zde uvedeny příklady využití těchto slitin v průmyslu a příklady společností, které tyto slitiny používají.

Tab. 1.2 Používané bezolovnaté pájecí slitiny [5]

Oblast tavení (°C)	Pájka	Využití v průmyslu	Společnost
<b>Slitiny s vysokým bodem tavení (&gt; 210 °C)</b>			
227	Sn/Cu	Spotřebitelský	Panasonic
		Telekomunikace	Nortel
221	Sn/Ag		
217	Sn/Ag/Cu	Automobilový	Panasonic

		Telekomunikace	Nokia, Nortel, Panasonic, Toshiba
217	Sn/Ag/Cu/Sb		
	Sn/In/Ag		
	Sn/Ag/Cu/Zn		
	Sn/Ag/Bi/Cu	Vojenský/Letecký	Panasonic
	Sn/Ag/Bi/Cu/Ge	Spotřebitelský	Sony
<b>Slitiny s bodem tavení v rozsahu 180 – 210 °C</b>			
206 – 213	Sn/Ag/Bi/X	Spotřebitelský	Panasonic
206 – 213	Sn/Ag/Bi	Vojenský/Letecký	Panasonic
		Spotřebitelský	Hitachi
199	Sn/Zn	Spotřebitelský	NEC, Panasonic, Toshiba
<b>Slitiny s nízkým bodem tavení (&lt; 180 °C)</b>			
	Sn/Bi/Zn		
138	Sn/Bi		Panasonic

Další tabulka znázorňuje vlastnosti jednotlivých prvků v bezolovnatých pájecích slitinách.

Tab. 1.3 Přehled vlastností prvků v bezolovnatých pájecích slitinách [6]

Prvek	Vlastnosti
<b>Stříbro (Ag)</b>	snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost a pevnost, dobrá elektrická vodivost
<b>Bismut (Bi)</b>	snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost
<b>Měď (Cu)</b>	zvyšuje pevnost
<b>Zinek (Zn)</b>	nízký bod tání, nízká cena
<b>Antimon (Sb)</b>	zvyšuje pevnost, snižuje povrchové napětí
	pro lepší roztékavost a menší pravděpodobnost tombstoningu
<b>Indium (In)</b>	snižuje bod tání
<b>Nikl (Ni)</b>	zabraňuje odsmáčení

### **1.3.1 Sn/Ag**

Z pohledu vysoké mechanické pevnosti a dobré spolehlivosti spoje jsou slitiny cínu a stříbra považovány za jednu z nejvhodnějších alternativ na místo olovnatých slitin. Mnoho zdrojů také udává, že se vyznačují velmi dobrými tepelnými únavovými vlastnostmi, srovnatelnými se slitinou Sn/Pb. Avšak co se týče smáčivosti, jsou tyto slitiny označovány jako jedny z nejhorších mezi těmi, které obsahují vysoký podíl Sn. Nejčastěji používanou slitinou této skupiny je slitina Sn96.5/Ag3.5 s teplotou tavení 221 °C. [6], [7]

### **1.3.2 Sn/Cu**

Jedná se o slitiny cínu a mědi. Nejvíce užívaným typem je pájecí slitina Sn99.3/Cu0.7, která má teplotu tavení 227 °C, proto je vhodná k použití při vyšších pracovních teplotách. Pokud jde však o mechanické vlastnosti, jsou u této slitiny nejspíše nejméně příznivé ze všech dostupných bezolovnatých pájek. Jelikož je však poměrně levná, je vhodná k používání u automatického strojního pájení vlnou. [1], [7]

### **1.3.3 Sn/Ag/Cu**

Tyto slitiny jsou všeobecně známy pod názvem SAC slitiny, přičemž počáteční velká písmena vypovídají o chemických prvcích, z kterých jsou tyto slitiny složeny: S – Sn, A – Ag, C – Cu. Tyto slitiny se od sebe vzájemně odlišují podle procentuálního zastoupení jednotlivých chemických prvků, které se vyvažují za účelem změny mechanických vlastností, nikoli snížení teploty tavení. Teplota tavení pájecích slitin SAC umožňuje jejich použití při vysokých provozních teplotách okolo 175 °C. Mezi nejvíce užívané SAC slitiny lze uvést SAC305, jejíž složení je Sn/Ag3.0/Cu0.5 a teplota tavení přibližně 219 °C. Vzhledem k 3% obsahu stříbra je slitina SAC305 poměrně drahá ve srovnání s tradiční pájecí slitinou Sn63/Pb37. Při porovnání vlastností pájecích slitin SAC305 a Sn/Cu, je bod tavení slitiny SAC305 nižší. Dále využívanou slitinou této skupiny je slitina SAC105, která je složena z 1 % Ag a 0,5 % Cu s teplotou tavení okolo 227 °C. Tato slitina se v dnešní době stále více prosazuje z důvodu menšího procentuálního obsahu stříbra, než je tomu u slitiny SAC305. Stříbro totiž způsobuje vznik intermetalických vrstev, které snižují odolnost pájeného spoje proti mechanickému namáhání, a zvyšuje prodejní cenu samotné slitiny. Některé zdroje dokonce uvádějí, že několik firem zabývajících se výrobou mobilních zařízení již přešlo k používání slitiny SAC105 na místo již zmiňované slitiny SAC305, jelikož spoje pájené slitinou SAC105 vykazovaly lepší výsledky při mechanických



zkouškách rázového charakteru. Jako další slitiny této skupiny lze uvést Sn/Ag0.3/Cu0.5 (s teplotou tavení 217 – 219 °C) nebo Sn95.5/Ag3.8/Cu0.7 (s teplotou tavení 217-219°C). Spoje pájené za pomoci SAC slitiny jsou hrubší a nelesklé, avšak jsou charakteristické svojí vysokou spolehlivostí a odolností proti únavě. [6], [7], [8], [9]

#### **1.3.4 Sn/Ag/Cu/X**

Slitina Sn96.2/Ag2.5/Cu0.8/Sb0.5 s teplotou tání 216 – 222 °C je považována za slitinu s vyšší odolností proti únavě než slitina Sn/Pb a podobnými mechanickými vlastnostmi slitině Sn/Ag. Některé zdroje navíc udávají, že přidáním 0,5 % Sb lze tuto slitinu dále zpevnit. Jako nevýhodu lze uvést cenu, která je vyšší kvůli svému zastoupení stříbrem. [1], [10]

#### **1.3.5 Sn/Ag/Bi/X**

Přidání bismutu u těchto slitin způsobuje, stejně jako u slitiny Sn/Bi, snížení bodu tavení a zlepšuje smáčivost pájeného spoje. Problém zde však nastává u rozdílné tepelné roztažnosti mezi pájkou a DPS, což v oblasti spoje způsobuje zvedání kužele. Pevnost těchto slitin jde zvýšit přidáním dalších prvků, jako jsou Cu nebo Ge. [1]

#### **1.3.6 Sn/Zn/X**

Tyto slitiny byly vyvinuty převážně z důvodu snížení ceny výrobků. Slitina Sn91/Zn9 není příliš vhodná k použití, jelikož zinek způsobuje její korozi a oxidaci. Proto se u nich nahrazuje zinek bismutem, ve formě slitiny Sn89/Zn8/Bi3, který snižuje náchylnost na vlhké prostředí. Navíc tato slitina má blízký bod tavení se slitinou Sn/Pb, tedy kolem 183 °C. [1]

#### **1.3.7 Sn/Sb**

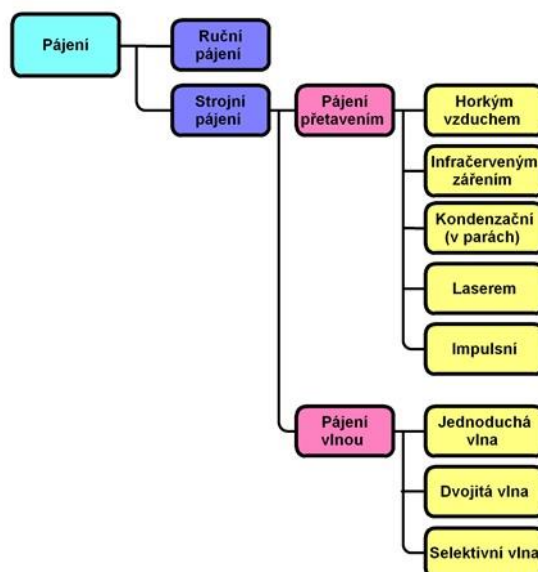
Pro tuto skupinu je charakteristická slitina Sn95/Sb5 s teplotou tavení 232 – 240 °C. Vyznačuje se špatnou smáčivostí, která je však o něco málo lepší než u slitiny Sn96.5/Ag3.5, a vysokou teplotou tavení, díky které je tedy opět vhodná spíše pro použití ve vysokoteplotních aplikacích. Antimon zvyšuje tvrdost a pevnost této slitiny, ale chová se toxicky. Navíc spoj pájený Sn/Sb slitinou, která obsahuje více než 4 % Sb, ztrácí na pevnosti v tahu. [7]

### **1.3.8 Sn/Bi**

Slitiny Sn/Bi jsou považovány za vhodnou náhradu již zmíněné olovnaté slitiny Sn/Pb. Vyznačují se nízkým bodem tavení, který je nižší než 180 °C, a díky kterému jsou vhodné pro použití pájení tepelně citlivých součástek. Další výhodou je jejich cena, která je nižší než většina ostatních bezolovnatých pájecích slitin. Co se týče mechanických vlastností, jsou o něco málo horší ve srovnání s ostatními bezolovnatými pájecími slitinami. Mezi nevýhody Sn/Bi slitin lze zařadit vyšší křehkost a nižší odolnost proti teplotním šokům a vibracím ve srovnání s Sn/Pb slitinou. Jako další podstatnou nevýhodu lze uvést fakt, že celosvětové zásoby bismutu jsou omezené a nemusí být dostatečné pro zásobování potřeb pájení vlnou. Přičemž v současné době pro průmyslovou výrobu jsou hlavním zdrojem bismutu především odpadní produkty vznikající po rafinaci olova. Avšak snaha celého světa směřuje k co největšímu omezení nebo úplnému zákazu používání olova v elektrotechnických výrobcích a tudíž se výroba olova značně omezuje. Této problematice je však věnována celá kapitola 1.1 této bakalářské práce. Nevýhodou je i poměrně nízká teplota tavení těchto slitin, jelikož pracovní teplota zařízení může být s touto teplotou srovnatelná nebo ji může dokonce i přesáhnout. Jako nejvíce užívanou slitinu této skupiny lze uvést Bi58/Sn42 s teplotou tavení 138 °C. [6], [7], [11]

## **1.4 Metody pájení**

V elektrotechnickém průmyslu existuje mnoho metod pájení. Každá metoda se vyznačuje svými specifickými vlastnostmi, kterými se odlišuje od ostatních metod pájení. Převážně se jedná o způsob nanášení pájecí slitiny na pájený spoj, cenu a samotnou rychlost pájecího procesu. Metody pájení lze rozdělit do dvou základních skupin. První skupinu tvoří ruční pájení, které bylo využíváno převážně do té doby, dokud výroba nebyla zautomatizována. Druhou skupinu představuje právě strojní pájení, které v dnešní době představuje převážnou část výroby. Strojní pájení lze dále rozdělit na další dvě metody, kterými jsou pájení přetavením a pájení vlnou. Jednotlivé metody pájení jsou zobrazeny na následujícím obrázku:



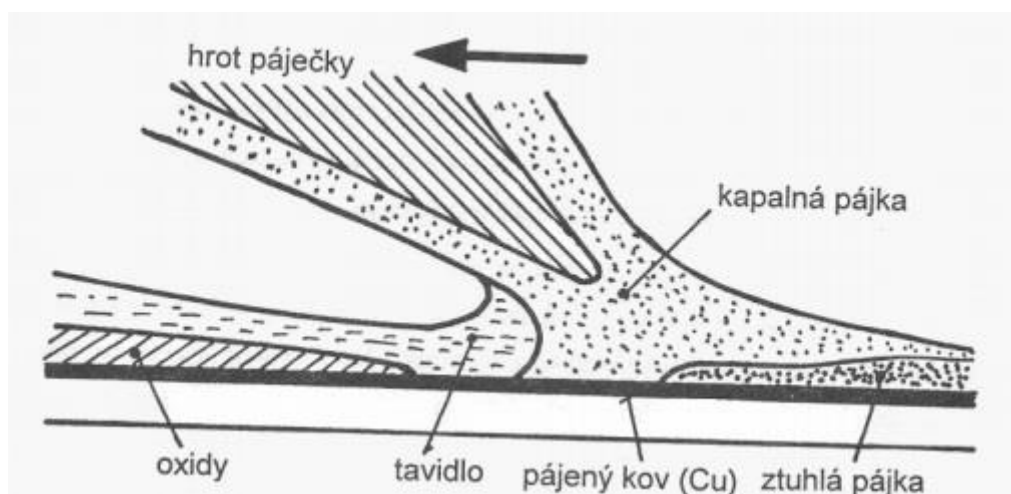
Obr. 1.2 Metody pájení [12]

### 1.4.1 Ruční pájení

Ruční pájení je považováno za nejstarší metodu pájení. Tato metoda je všeobecně velmi rozšířená, ale také poměrně nespolehlivá. Veškeré úkony, které rozhodují o kvalitě spoje, u této metody nejdou dostatečně přesně opakovat. Nejistými faktory jsou zde i tepelné zatížení spoje, množství pájky ve spoji a doba procesu pájení. Proto se ruční pájení využívá převážně pouze jako doplňující metoda po pájení strojním sloužící k opravám chybně zapájených spojů, anebo pro dodatečné propojení součástek, které z určitého důvodu nelze pájet hromadně. [13]

Při tomto způsobu pájení se využívá ruční páječky, která je napájena nízkým napětím a u které lze regulovat a stabilizovat požadovanou teplotu. Páječka je vybavena hrotem, který je charakterizován svým tvarem, hmotností a materiálem, ze kterého je zhotoven. Tento hrot musí být pevně spojen s rukojetí páječky. Poté, co se hrot zahřeje na pracovní teplotu, pokryje se tenkou vrstvou pájky a očistí se vlhkou podložkou zhotovenou z jemného materiálu, který nesmí obsahovat síru. Přitom však musí na povrchu hrotu zůstat tenká lesklá vrstva pájky, která se na pracovní ploše samotného hrotu musí udržovat po celou dobu pájení z důvodu zaručení spolehlivého přenosu tepla do spoje. Problém zde tvoří i odlupující se vrstvy oxidů na pájecím hrotu a na plochách mezi topným tělesem a hrotem, které se zde nesmí hromadit. Samotný spoj je ohříván pájecím hrotem páječky bezprostředně po tom, co je nanese tavidlo. Tavidlo se na spoj nanese buďto před

vlastním ohřevem, anebo se uvolní z dutiny v trubičce pájky až po ohřevu. Tvorba spoje je znázorněna na následujícím obrázku: [13]



Obr. 1.3 Tvorba spoje u metody ručního pájení [13]

#### 1.4.2 Pájení vlnou

Pájení vlnou je považováno za první historickou hromadnou metodu strojního pájení a stále zaujímá dominantní pozici ve výrobě pájených spojů. [1] Princip této metody spočívá v posouvání DPS po dopravníku (typická rychlost posunu desky je  $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ), kdy při procházení nad hladinou je povrch desky smočen roztavenou pájkou, která je tvořena jednou či více pájecími vlnami. Celý tento proces lze rozdělit do tří základních kroků a teplota během něj je přizpůsobena optimálnímu provedení všech dílčích úkonů. Jednotlivé úkony jsou představeny zde:

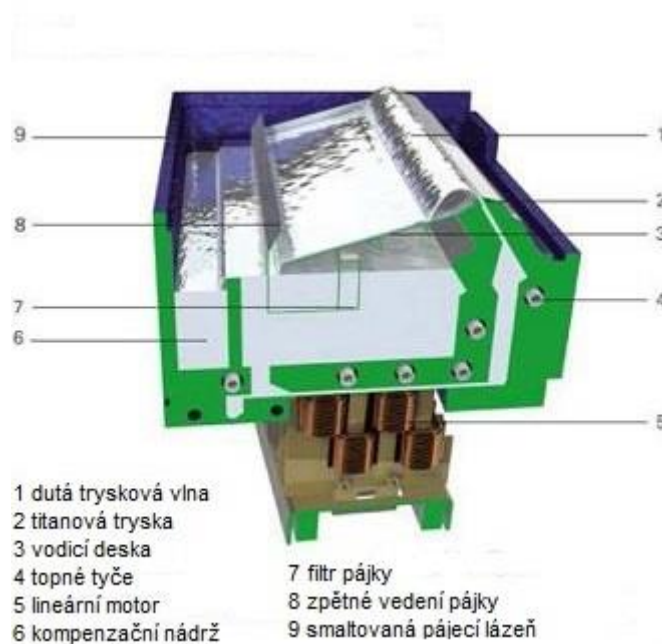
- nanesení tavidla,
- předehřev pájené desky,
- vlastní pájení vlnou.

Tavidlo se vždy nanáší v kapalném stavu a může být nanášeno různými způsoby, např. pěnou tvořenou za pomoci vzduchovací trubice, která smáčí spodní stranu DPS, nebo otáčejícím se kartáčem v nádrži, který spodní stranu DPS tavidlem potírá. Vždy je však třeba nanést rovnoměrnou vrstvu na straně pájení bez nadbytku tavidla. [1]

Po nanesení tavidla následuje předehřev DPS v zóně předehřevu před samotným pájením vlnou. Tento krok je velmi důležitý, jelikož se v průběhu odpařují těkavé složky

tavidla a deska je na konci ohřátá na definovanou teplotu předehřevu, při které se tavidlo začíná aktivovat a působit redukčně (aktivátor – viz kapitola 1.2). Navíc je také velmi snížen tepelný šok samotné DPS a součástek před kontaktem s roztavenou pájkou. Předehřev je řešen za pomoci infračervených zářičů a teplota na straně součástek během tohoto procesu postupně roste rychlostí asi  $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ . [2]

Posledním krokem této metody pájení je vlastní pájení vlnou. Proud roztavené pájky je poháněn čerpadlem s tryskou, přičemž tvar samotné trysky udává směr a rychlost proudění roztavené pájky. Při tomto procesu je důležité, aby došlo k dokonalému smočení všech připojovaných míst pájecí slitinou. Jednotlivé pájené díly jsou prohřáty na pájecí teplotu a smočeny pájkou, která za pomoci kapilárního vztlínání a hydrostatického tlaku vyplní oblast spoje. Při tomto procesu se využívá tzv. *jednoduchá vlna*, *dvojitá vlna* nebo *selektivní vlna*. [2]

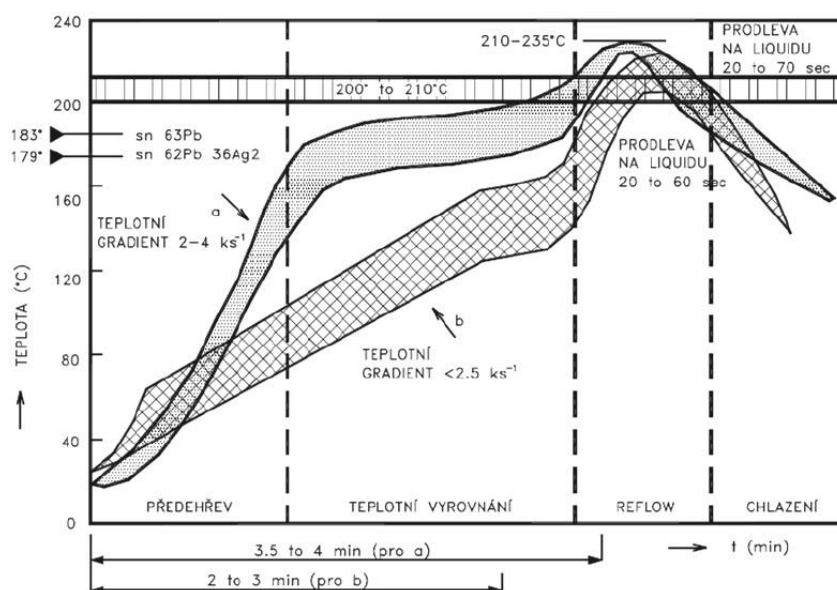


Obr. 1.4 Principiální zobrazení pájení vlnou [14]

### 1.4.3 Pájení přetavením

Pájení přetavením je druhou metodou hromadného strojního pájení. Tato metoda je oproti metodám ručního pájení a pájení vlnou specifická tím, že využívá opačného postupu. Nejprve se totiž před vlastním pájením na povrch pájených předmětů nanese potřebné množství pájecí pasty (směs složená z cca 90 % kovových pájecích zrn a 10 % tavidla) [1], do které se součástky osadí a poté následuje přetavení při teplotě vyšší než je

bod tání pájky v pájecí pastě. Typický teplotní profil pro tuto metodu je zobrazen na obr. 1.5 [13]



Obr. 1.5 Teplotní profil a) standardní pájecí pasta b) no - clean pájecí pasta [15]

Pro jednotlivé přichycení součástek pro povrchovou montáž desky se využívá lepidivého účinku pastovité pájky. Jedná se o složitou operaci, jelikož je třeba, aby pájecí pasta byla nanesena v optimálním množství na správnou přípojovací plošku. Navíc se musí brát ohled na provedení jednotlivých vývodů u součástek pro povrchovou montáž, které mohou být zhotoveny ze slitiny stříbra. Pastovitá pájka je na plošky nanášena následujícími způsoby:

### Nanášení dávkováním (disperze)

Ruční či strojní dávkovač nanáší potřebné množství pastovité pájky na pájená místa. Tento typ nanášení je převážně využíván pro výrobu s velkou kusovou či vzorkovou růzností, při kterém by se příprava šablon či sít nevyplatila.

### Nanášení sítotiskem nebo šablonovým tiskem

Pájecí pasta je vtlačována za pomoci třerky přes otvory síta nebo šablony na pájecí místa. Zde jsou důležitými faktory tloušťka samotné šablony a velikosti otvorů (poměr délky a šířky otvoru) šablony a síta. Tyto faktory totiž ovlivňují množství natisknuté pasty, která se na pájených místech bude vyskytovat.

Po nanesení následuje již výše zmíněné přetavení pájecí pasty tepelným ohřevem. Tento proces je doprovázen jedním či více současně působících způsobů přenosu tepla, kterými jsou: *proudění, vedení nebo záření*. Významný činitel, který tento proces také může ovlivnit je atmosféra, která se může chovat inertně nebo aktivně. Všechny tyto zmíněné vlivy určené svým aktuálním podílem vypovídají jak o stavu a materiálu na vstupu, tak o produkci a její kvalitě ve výsledku. [2], [13]

Metoda pájení přetavením může být dále rozdělena podle způsobu ohřevu (viz Obr. 1.2). Tato metoda byla také využita v praktické části bakalářské práce (viz kapitola 3.).

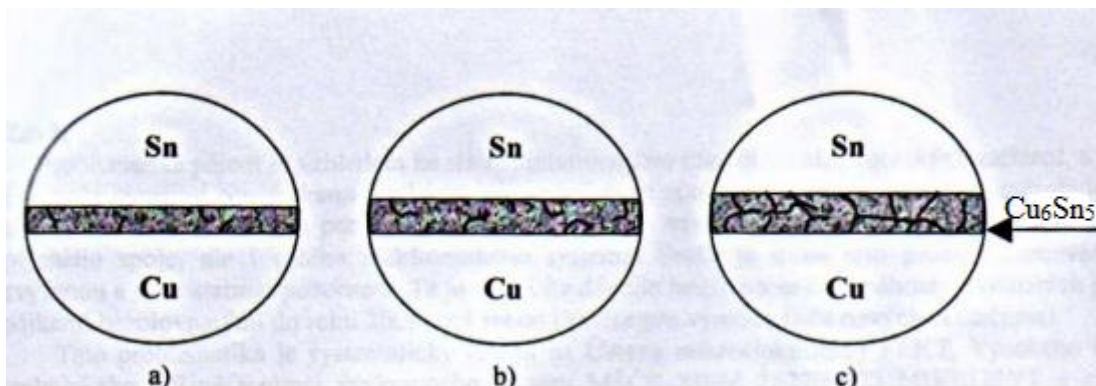
## **1.5 Životnost a spolehlivost pájeného spoje**

V první řadě je třeba podotknout, že spolehlivost a životnost pájeného spoje spolu velmi úzce souvisí a nelze odloučit jedno od druhého. [16] Spolehlivost v ČSN IEC 50(191) (010102) je definována jako: „*Obecná vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek.*“ [17] Zatímco životnost lze obecně definovat jako dobu, za kterou se výrobek opotřebuje natolik, že není schopen plnit svoji funkci. [1]

### **1.5.1 Životnost pájeného spoje**

Životnost většiny výrobků je zpravidla pouze několik let, proto se již v minulosti u klasických součástek zjišťovala za pomoci tzv. zrychlených zkoušek. Tyto zkoušky simulují pracovní režim výrobku za zvýšené, resp. snížené teploty a v případné zvýšené relativní vlhkosti. Pájený spoj je tím pádem přímo vystaven těmto faktorům, které vyvolávají zrychlené stárnutí. Dochází tedy k simulaci vnitřních jevů probíhajících v pájených spojích a součástkách a tak se zrychlí jejich degradace. V první řadě se zde jedná o dva fyzikální procesy, a to o procesy difuze a elektrochemické koroze. Difuze materiálů se projevuje vznikem intermetalických slitin a jejich nárůstem. Což způsobuje problémy se snížením elektrické vodivosti intermetalických vrstev, které se postupem času stále zvětšují. Tento proces následně způsobuje celkovou nefunkčnost pájeného spoje. Elektrochemická koroze naopak způsobuje změnu vlastností materiálu pájeného spoje. Dochází zde ke zhoršení adheze, zvýšení křehkosti a narušení homogenity pájeného spoje.

To zpravidla způsobuje jeho zhoršení mechanické pevnosti a rovněž vede k jeho destrukci. [1]



Obr. 1.6 Znárodnění vlivu stárnutí a namáhání v intermetalické vrstvě  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ :  
 a) ve vrstvě se objevují trhliny  
 b) vrstva roste, trhlín přibývá a zvětšují se  
 c) vrstva a trhliny jsou natolik velké, že může dojít až k nefunkčnosti spoje [1]

Mezi nejčastější způsoby testování pájeného spoje patří testování teplotními cykly. Takové testování se provádí za různých teplotních rozmezí (např. od  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  do  $+150\text{ }^\circ\text{C}$ ), po určitou dobu (např. 1000 hodin), nebo pro předem určený počet cyklů (např. 10 000). V průběhu tohoto testování se sleduje vzhled, mechanická pevnost a vodivost pájených spojů po určitých časových úsecích (např. po každých 250 hodinách). Důležité je také zvolit vyhovující testovací režim, ten by se měl co nejvíce blížit pravděpodobnému pracovnímu prostředí, ve kterém se bude pájený spoj za provozu nacházet. Výsledky testování se na závěr zpracovávají za pomoci statistických metod či graficky. [1], [16]

### 1.5.2 Spolehlivost pájeného spoje

Spolehlivost pájeného spoje je čas, po který je zaručena spolehlivá funkce spoje, to znamená předem definovaná vodivost spoje. Samotná spolehlivost pájeného spoje je přímo ovlivňována řadou faktorů, přičemž ty nejzákladnější jsou: [1]

- tepelné namáhání,
- mechanické namáhání,
- stárnutí materiálu.

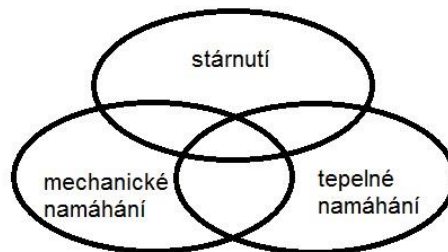
Pro testování spolehlivosti pájeného spoje se právě nejčastěji využívá tepelného namáhání a účinků s tímto namáháním spojených, jak již bylo zmíněno výše (viz kapitola



1.5.1 odst. 2). Tepelné namáhání je vyvoláno dopadem tepla, které působí na pájený spoj. Takové namáhání lze rozdělit podle způsobu vzniku na vnější, které působí na pájený spoj z vnějšího okolí, a na vnitřní, které je důsledkem průchodu proudu či vzniklého ztrátového výkonu. [1], [16]

Mechanické namáhání je příčinou opotřebení materiálu pájeného spoje a tím dochází ke zhoršení jeho mechanických vlastností a následnému poškození. Mechanické namáhání lze opět rozdělit, podle způsobu působení, do dvou typů. Prvním je vnější, který je zapříčiněn činiteli působící na spoj z vnějšího okolí (např. vibrace) a druhým je vnitřní. U vnitřního je spoj namáhán změnami vnitřních poměrů (např. tepelným namáháním). [1]

Stárnutí pájených spojů je hlavně způsobeno tvorbou difuzní vrstvy. Ta sice na jednu stranu potvrzuje fakt, že se vytvořil pájený spoj, ale na druhou má tato vrstva negativní dopad na elektrické a mechanické vlastnosti samotného spoje. Difuzní vrstva je tvořena výše zmíněnými intermetalickými slitinami  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ,  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  atd. (viz kapitola 1.5.1 odst. 1) [1]



Obr. 1.7 Faktory ovlivňující pájený spoj [1]

Během hodnocení spolehlivosti pájených spojů se při testování sleduje široká škála vlastností. Sledované vlastnosti jsou nakonec vyhodnoceny na základě některého z mnoha spolehlivostních testů. Mezi základní spolehlivostní testy patří: [2]

- sledování struktury materiálu spojů,
- sledování tvaru spojů,
- sledování elektrických vlastností spojů,
- sledování adheze spojů,
- sledování migrace iontů.

## 1.6 Pájitelnost

Popisuje schopnost povrchu být smáčený pájkou během procesu pájení. Pájitelnost je také úzce spjata s jinými faktory, které jsou důležité pro tvoření pájeného spoje. Na pájitelnost lze nahlížet ze tří hledisek:

- **Smáčivost** – Povrch materiálu musí být dobře smáčitelný roztavenou pájkou po dobu, která je potřebná k vytvoření pájeného spoje.
- **Teplotní hledisko** – Součástky a konstrukční prvky musí umožnit zahřátí pájecích plošek na požadovanou teplotu.
- **Odolnost vůči vznikajícímu teple při procesu pájení** – Součástky, mechanické a konstrukční části musí odolat teplotnímu namáhání, aniž by se změnilы požadované vlastnosti a funkce jednotlivých komponentů. [4]

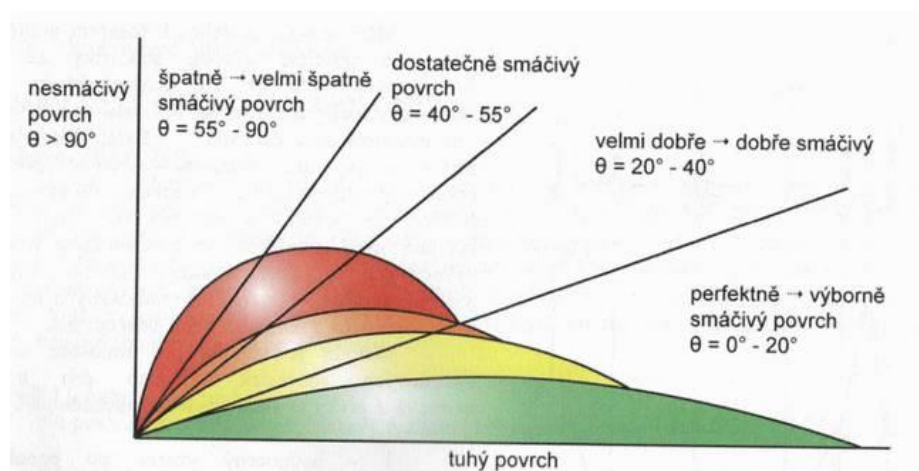
Dobrá úroveň smáčení obecně vede k vytvoření rovnoměrné, hladké a neporušené vrstvy pájky na základním kovovém materiálu. [18] Během procesu smáčení tuhého povrchu roztavenou pájkou se pájka roztéká po povrchu a zmenšuje volný povrch. Pájka postupně získá takový tvar, který má v daném systému minimální povrchovou energii. Smáčivost je 1. fází vzájemného fyzikálně-chemického působení atomů roztavené pájky na povrch spojovaného materiálu. Při smáčení začínají působit meziatomární síly. Na místech mezifázového rozhraní tak postupně vznikají vazby, které se rozšiřují po celé ploše styku. Dochází přitom ke snižování volné povrchové energie systému. Během procesu smáčení se dva volné povrchy (roztavená pájka a tuhý kov) mění v jedno mezifázové rozhraní. Na tomto mezifázovém rozhraní přechází atomy roztaveného kovu do mřížky tuhého kovu. Dochází ke spojování valenčních elektronů jednotlivých kovů a k vytvoření kovové vazby. [19]

Jednotlivé stupně smáčení lze rozdělit následujícím způsobem: [1]

- **Nesmáčení** – Příklad, kdy se nevytvoří metalurgická vazba a rozhraní mezi pájkou a povrchem zůstává patrné i přes skutečnost, že byl povrch vystaven kontaktu s dostatečně roztavenou pájkou. Povrchové znečištění nemohlo být odstraněno po použití tavidla, jelikož vrstva oxidů je příliš silná nebo tavidlo není dostatečně aktivní.

- **Smáčení** – Stav, při kterém má roztavená pájka nižší povrchovou energii, než je povrchová energie čistého kovového povrchu. Za tohoto předpokladu je povrch smočen pájkou, která tak na rozhraní vytvoří metalurgickou vazbu. Při postupujícím smáčení na rozhraní roste tenká mezikovová vrstva a dochází tak k vytvoření základu pro spolehlivý spoj.
- **Odsmačení** – Situace, při které se roztavená pájka stáhne zpět z pájeného povrchu, který byl předtím pájkou smáčen. Vznikající vrstvy na rozhraní obsahují velké množství cínové směsi. V případě pájení olovnatou pájecí slitinou vznikají místa bohatá na olovo, z důvodu postupného odtavování cínu z pájecí slitiny. Tyto místa mají poměrně slabou pájitelnost. Klesá-li teplota dostatečně dlouhou dobu, pak bude velikost těchto oblastí postačující k tomu, že dojde k ustoupení pájky z již dříve smáčených oblastí. Tento případ vzniká převážně v důsledku nedostatečné smáčivosti spojovaných povrchů.

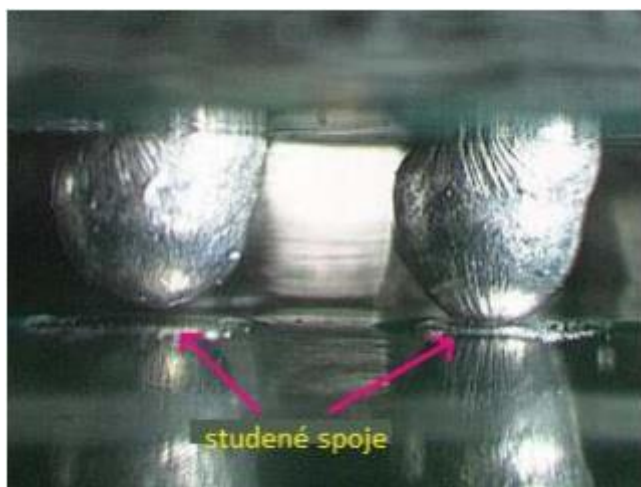
Jakákoliv vrstva oxidů nebo nečistot na pájeném povrchu může tvořit překážku metalurgickému spojení a tím zabránit smáčení. Na takovémto povrchu se pájka chová podobným způsobem jako kapka vody na mastné desce. Kvalitu smáčivosti povrchu vyjadřuje tzv. smáčecí úhel. Čím menší tento úhel je, tím kvalitněji je povrch smáčen (viz Obr. 1.8). [4], [18]



Obr. 1.8 Rozdělení smáčivosti povrchů podle velikosti smáčecího úhlu [20]

Výše zmíněná vrstva oxidů je mezi pájeným kovem a pájkou přítomna zpravidla v případech, kdy se pájí při nižších teplotách. Takové spoje se nazývají studené spoje.

Studený spoj se definuje jako zašedlý pórovitý spoj, který je špatně smáčený a při pájení pájka zpravidla ani nepřilne k povrchu pájení (viz Obr. 1.9). [18]



Obr. 1.9 Studené spoje [21]

## 2 Zkoušky mechanických vlastností pájeného spoje

V elektronických sestavách jsou jednotlivé součástky a substráty vzájemně mechanicky a elektricky propojeny pomocí pájecích procesů. Jelikož pájený spoj zpravidla představuje nejslabší místo v sestavě, určuje tento spoj i její celkovou životnost. Z tohoto důvodu se odhady životnosti elektronických zařízení získávají sledováním degradace (popř. selhání) pájených spojů za použití vnějších zatěžovacích sil nebo za zrychlených podmínek. Takové odhady životnosti pájených spojů jsou také nezbytné pro získání zpětné vazby sloužící např. k dosažení a udržení správného řízení pájecích procesů, nebo zvolení vhodné pájecí slitiny samotného pájecího procesu. [22]

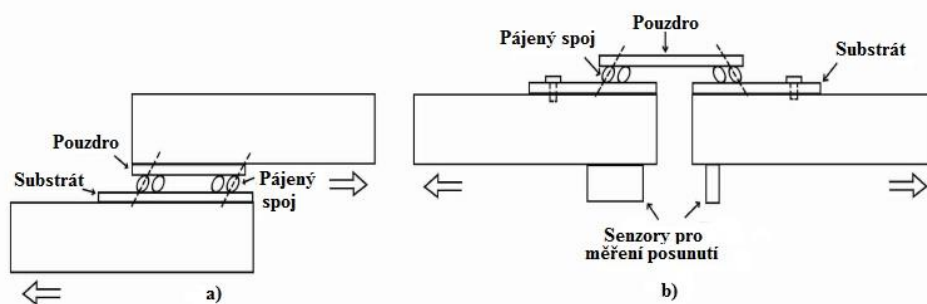
Mechanické zkoušky slouží obecně ke znázornění deformace pájky v závislosti na čase za působení vnějších mechanických sil. Tyto zkoušky lze provádět různými metodami, např. smykem, tahem, stříhem... [22] Veškeré typy těchto zkoušek jsou popsány technickými normami, které slouží k získávání a následnému porovnávání hodnot dosažených při měření s hodnotami referenčními. ČSN (Česká technická norma) je označení pro technické normy na území České republiky, naopak evropské normy se označují iniciálami EN. V dnešní době české technické normy (ČSN) postupně přejímají ty evropské (EN) z důvodu snadnější vzájemné spolupráce v oblasti obchodu a průmyslu. [23]

### 2.1 Mechanická únavová zkouška smykem

Mechanické zkoušky tohoto typu jsou popsány normou ČSN EN 62137-1-5 a jsou určeny pro testování součástkových pouzder typu BGA, které mají své vývody uspořádané do plošného pole. Metoda mechanického smykového namáhání hodnotí únavové doby života pájených spojů mezi vývody součástek a ploškami na podložce, a po vyhodnocení únavového lomu lze předpovědět spolehlivost pájených spojů. Konečné vyhodnocení se také provádí z důvodu zvýšení pevnosti pájených spojů. [24]

Testování se vykonává v několika krocích, přičemž se nejprve provede, za pomoci pájení přetavením, připevnění součástky na substrát a následně se realizuje cyklická

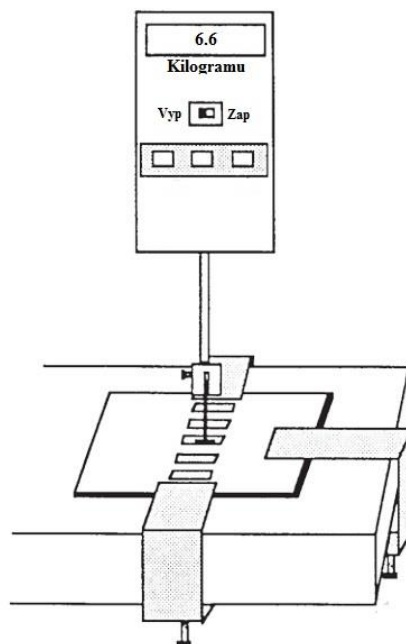
mechanická deformace pájených spojů, dokud nezačne docházet k praskání pájených spojů. Nejprve se substrát s připájenou součástkou vloží do přístroje, který danou zkoušku vykoná. Na přístroji je nutné nastavit vhodný rozsah posunutí. Norma udává vhodný rozsah posunutí v rozmezí od  $\pm 0,001$  mm do  $\pm 0,1$  mm, a udává také rychlost posunutí, tu je možno nastavit v rozmezí od  $\pm 0,001$  mm.s<sup>-1</sup> do  $0,01$  mm.s<sup>-1</sup>. Přístroj musí být mimo jiné opatřen senzory, které sledují předepsané posunutí v okolí vzorku, musí být schopen změřit a zaznamenat počet měřicích cyklů, celkový čas prováděného měření, čas, při kterém dojde k mechanické deformaci pájeného spoje a musí být schopen kontrolovat teplotu testování, pokud se testování provádí za zvýšené teploty. Test je následně ukončen po deformaci pájeného spoje, kdy dojde k poklesu síly např. o 20 % nebo pokud dojde k elektrickému přerušení. Norma uvádí tři možné způsoby testování, přičemž první z nich testuje jednotlivé pájené spoje a zbylé dva způsoby testují již celé sestavy se zapájenou součástkou. [24]



Obr. 2.1 Mechanická únavová zkouška smykem [24]

## 2.2 Zkouška tahem

Tento druh zkoušky je prováděn na testovacím přístroji, který musí být schopen zatížit testovací vzorek v rozmezí od 0 kg do 14 kg. Nejprve je třeba změřit povrch pro zafixování testovacího pinu. Měření se provádí pomocí mikroskopu se zvětšením ne méně než 10x. Následně je třeba testovací vzorek a testovací pin důkladně očistit pomocí roztoku složeného z 75% isopropylalkoholu a 25% destilované vody. Testovací pin se poté pájí do středu povrchu testovacího vzorku při možné teplotě od 232 °C do 260 °C, přičemž testovací pin musí svírat s povrchem vzorku úhel v rozmezí  $90^\circ \pm 5^\circ$ . Po dokončení této přípravy se může přejít k samotnému testování, které se provádí, není – li určeno jinak, při pokojové teplotě od 18 °C do 30 °C. Volný konec testovacího pinu se umístí do čelistí testovacího přístroje, který vyvíjí sílu kolmou k testovacímu vzorku, jejíž rychlost je 50 mm.s<sup>-1</sup>, do doby, dokud nedojde k deformaci pájeného spoje nebo síla nepřekročí svoji nastavenou mez. Následně je hodnota této síly zaznamenána. [25]



Obr. 2.2 Mechanická zkouška tahem [25]

### 2.3 Zkouška stříhem

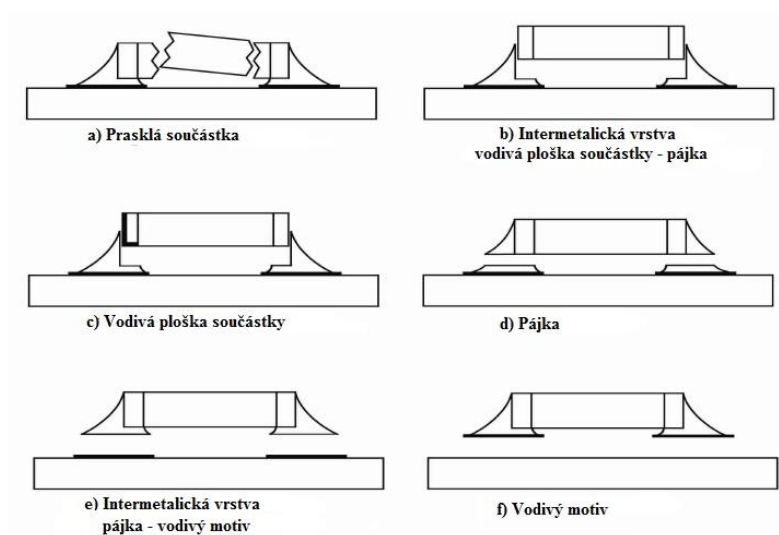
Tato metoda testování pájených spojů je zahrnuta v normě ČSN EN 60749-19 jako zkouška pevnosti čipu stříhem, která je obecně použitelná pro pouzdra s dutinou, nebo se využívá jako provozní kontrola. Naopak není doporučena pro plošky čipů, které mají obsah větší jak  $10 \text{ mm}^2$ , pro technologii čelních čipů či pro pohyblivé podložky. Dále je zahrnuta v normě ČSN EN 62137-1-2 jako zkouška pevnosti ve smyku použitelná pro součástky bez vývodů a konektory určené pro povrchovou montáž, pro které není vhodná zkouška odolnosti v odtrhu. Zkouška je také vyhovující pro hodnocení pevnosti pájeného spoje mezi součástkovým vývodem a ploškou na substrátu při opakované změně působících teplot. Tato metoda se naopak nepoužívá pro součástky s více vývody nebo pro ty, které mají vývody typu racčího křídla. [26], [27]

Přístroj používaný pro tento typ zkoušky umožňuje testování pájeného spoje pomocí lineárního silového působení. Dle normy ČSN EN 60749-19 by měla být přesnost daného přístroje 5 % plného rozsahu nebo  $\pm 0,5 \text{ N}$ . Dále by měl být schopen ukázat, jaké zatížení je v daný okamžik aplikováno, měl by být vybaven vhodným zdrojem světla a mikroskopem (např. s 10 x možným zvětšením), z důvodu možné vizuální kontroly trhlin pájeného spoje během testování. Charakter trhlin vyskytujících se na pájeném spoji při testování a velikost testovací síly vyznačuje pevnost samotného spoje. Zkouška definuje

velikost síly, kterou je nutno použít k odtržení připájené součástky a selhání testovaného vzorku. [26]

Tento typ testování lze možno provádět za běžné teploty okolí, za zvýšené teploty nebo za pomoci teplotního cyklování. Při použití teplotního cyklování by se měla dodržovat spodní hranice teploty - 40 °C a horní hranice + 125 °C a celkový proces pro dosažení horní hranice by měl trvat 30 min. Doporučený minimální počet teplotních cyklů je 500 a maximální 1000. Po ukončení teplotního cyklování je zkoušející vzorek vystaven běžným atmosférickým podmínkám a je možno ho měřit a testovat až po více než 4 hodinách. [27]

Při provádění této metody je také velmi nezbytné správné nastavení stříhové hlavy, ta by měla být v rovnoběžné rovině s testovanou součástkou a měla by být nastavena ve výšce tak, aby tlak vyvinutý při testování působil do co možná největšího obsahu plochy testované součástky. Opačný případ vede k předčasné deformaci pájeného spoje a tím ke zkreslení získaných výsledků. Důležité je také nastavit rychlost procesu posuvu, ten by měl být v rozmezí od 0,5 mm.min<sup>-1</sup> do 9 mm.min<sup>-1</sup>. Po správném nastavení stříhové hlavy následuje samotné testování. [27]



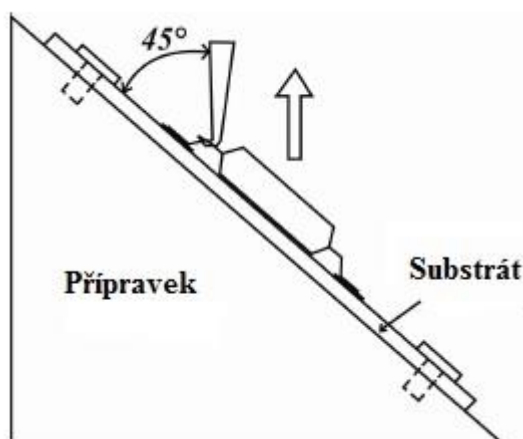
Obr. 2.3 Možné deformace při testování stříhem [27]



## 2.4 Zkouška odolnosti proti odtržení

Testování tohoto typu je popsáno v normě ČSN EN 62137-1-1 a je použitelné pro součástky určené k povrchové montáži s vývody typu racčího křídla. Stejně jako v předchozím případě, při testování pájeného spoje stříhem, lze i u této metody použít teplotní cyklování se shodnými mezními hranicemi teplot, dobou trvání a počtem cyklů. Po procesu pájení a následnému vystavení standartním atmosférickým podmínkám se smí deska se součástkou měřit a testovat až po více než 4 hodinách. Testovaná deska je při testování umístěna tak, aby tahová destruktivní síla působila na součástku pod úhlem 45 °. Rychlost působící síly je závislá na typu součástky, přičemž pro součástky typu SOIC, TSOP, QFP s roztečí vývodů 0,5 mm je doporučena rychlost tahu 0,5 mm.min<sup>-1</sup>. I tato metoda testování je destruktivního charakteru a je vždy ukončena a vyhodnocena poté, jakmile dojde k jednomu z následujících případů: [28]

- Utržení nožičky od součástky.
- Utržení mezi intermetalickou vrstvou
- Utržení celého pájeného spoje od kontaktní plošky
- Utržení celého pájeného spoje i s kontaktní ploškou.



Obr. 2.4 Zkouška odolnosti proti odtržení [28]

## 2.5 Zkouška cyklickým padáním

Mechanické testování tohoto typu je popsáno v normě ČSN EN 62137-1-3 a týká se součástek, které jsou určeny pro povrchovou montáž (SMD) a obrazců plošek na deskách s plošnými spoji (PWB). Zkouška cyklickým padáním je určena pro testování pevnosti

pájených spojů komponent a součástek, které mají vyšší počet vývodů a jsou zároveň větších rozměrů, a simuluje pád daného zařízení z určité výšky. [29]

V první kroku testování se připevní tenzometr pro měření mechanického napětí, které vzniká při deformaci testované DPS. Ten by měl být připevněn na té straně desky, kde je umístěn daný komponent zařízení nebo součástka a měl by být vzhledem k desce orientován paralelně. Dále následuje umístění testovaného vzorku do přístroje, který simuluje pád z dané výšky. Pro tento typ testování jsou standardizované výšky 0,75 m a 1,5 m. Testovaná deska je také během procesu měření připojena k zařízení, které kontroluje, zda nedošlo k elektrickému přerušení a tím pádem kontroluje celkovou funkčnost. Testovaná deska je opakovaně pouštěna z každé testovací výšky do té doby, dokud nedojde k elektrickému přerušení. K dosažení prvního selhání platí nezávislost mezi vybranou výškou a počtem opakování pádů, čím větší je mechanické napětí, tím se snižuje počet pádů. Elektrického přerušení u této metody zkoušení pevnosti pájených spojů může být dosaženo trhlinou v pájce, přerušením povrchového pokovení nebo trhlinou vzniklou v pokoveném otvoru. [29]

## **2.6 Zkouška cyklickým ohybem**

Tato metoda je popsána normou ČSN EN 62137-1-4 a používá se pro součástky typu QFP a BGA, které jsou určeny pro povrchovou montáž. Metoda zkoušení cyklickým ohybem za pomoci cyklického ohýbání substrátu hodnotí pevnost a trvanlivost spojů pájených mezi vývody součástek a ploškami na substrátu. Simuluje opakované mechanické namáhání, jako je např. mačkání kláves mobilních zařízení, a tím určuje, jaký dopad má tento typ namáhání na pevnost pájených spojů daného zařízení. [30]

V prvním kroku měření mechanické pevnosti pájeného spoje touto metodou se testovaná deska umístí do přístroje, který je vybaven třemi hroty. Dva z toho jsou situovány na krajích a slouží k zafixování testované desky, třetí je umístěn mezi nimi ve středu a slouží k vyvíjení tlaku na desku a následnému ohybu desky. Deska je během procesu měření připojena také k přístroji měřící elektrický odpor, a který zároveň sleduje, zda již nedošlo k elektrickému přerušení, a tím pádem k selhání testovaného vzorku. Přístroj je schopen zaznamenat elektrické přerušení v délce 10 až 100  $\mu\text{s}$ . Rychlost prohybu desky z počáteční do konečné pozice a naopak se volí  $0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Maximální

průhyb desky se volí v rozsahu od 0,5 mm do 5 mm a vykonává se několik tisíc cyklů, přičemž záznamové zařízení při testování zaznamenává vynaložený tlak, posuv a konečný počet cyklů. [30]

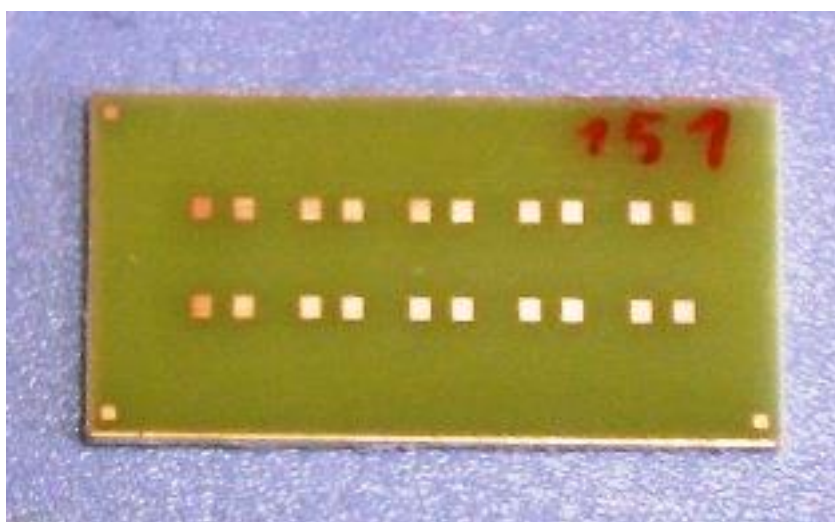
## 3 Praktická část

### 3.1 Úvod měření

Úkolem praktické části této bakalářské práce bylo zjistit, jaký vliv má různé množství bezolovnaté pájecí slitiny, nanesené na DPS, na mechanickou pevnost pájeného spoje. Jako metoda pro měření tohoto experimentu byla vybrána mechanická zkouška smykem. Měření bylo realizováno v laboratořích na Katedře technologií a měření na Fakultě elektrotechnické na Západočeské univerzitě v Plzni. Katedra též poskytla veškeré přístroje a materiály potřebné pro provedení tohoto experimentu.

### 3.2 Použité materiály a postupy měření

K měření bylo použito celkem dvacet DPS, které byly v prvním kroku očištěny od povrchových vrstev oxidů a zváženy. Následně se na DPS nanasla jedna ze dvou druhů pájecích past a po nanesení této pasty byly DPS opět zváženy. V dalším kroku se DPS osazovaly součástkami a pájely pomocí procesu přetavení v přetavovací peci, přičemž tento proces byl prováděn dvěma různými teplotními profily. Po procesu přetavení byly hotové vzorky ponechány cca 24 hodin při pokojové teplotě za účelem vychladnutí a stabilizace. V posledním kroku byly vzorky podrobeny zkoušce mechanické pevnosti pájených spojů, která byla realizována na trhacím stroji, za pomoci kterého byly změřeny síly potřebné k odtržení součástky.



Obr. 3.1 Připravený vzorek č.151 pro nanesení bezolovnaté pájecí slitiny

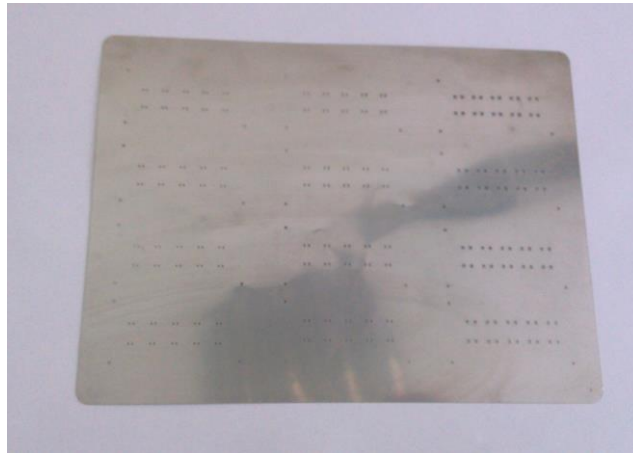
### 3.2.1 Pájecí slitiny

Jak již bylo zmíněno, pro testování byly vybrány dvě různé bezolovnaté pájecí slitiny. Jako první byla zvolena slitina Cobar SAC305 OT2 s teplotou tavení 217 – 219 °C, která je produktem firmy Balver Zinn Josef Jost GmbH & Co. KG. Procentuální zastoupení jednotlivých prvků této slitiny je 96,5 % Sn - 3 % Ag - 0,5 % Cu. Slitina byla nanášena ve formě pájecí pasty, která je tvořena částicemi o velikosti 24 - 45 μm a jejíž objem tvoří z 88 % kovová složka a 12 % tavidlo. Jako druhá slitina, která byla použita pro praktický experiment, byla slitina Loctite GC 10. Tato slitina byla též ve formě pájecí pasty s procentuálním zastoupením prvků 96,5 % Sn – 3 % Ag – 0,5 % Cu, velikostí částic 20 - 35 μm. Objem této slitiny tvoří 88,5 % kovová složka a zbývajících 11,5 % tavidlo. Teplota tavení slitiny Loctite GC 10 je 217 °C.

Pájecí pasty byly nanášeny na povrchy očištěných DPS přes dvě různé šablony s různě velkými profily otvorů za pomoci třerky. Tloušťky jednotlivých šablon byly 120 μm a 80 μm. Základní délka jednoho otvoru v šabloně byla 1,7 mm a základní šířka 0,9 mm. Tyto rozměry odpovídají velikosti pájecí plošky pro SMD součástku 1206. K praktické části práce byly dále využity menší otvory šablon, jejichž rozměry byly oproti rozměrům otvorů základního profilu redukovány o 5, 10 a 20 %, díky čemuž bylo možné nanášet menší objem pájecí slitiny na připravené vzorky. Schéma využitých otvorů šablon pro experiment lze přehledně vidět v následující tabulce. (viz Tab 3.1)

Tab. 3.1 Parametry šablon pro nanesení pájecí pasty

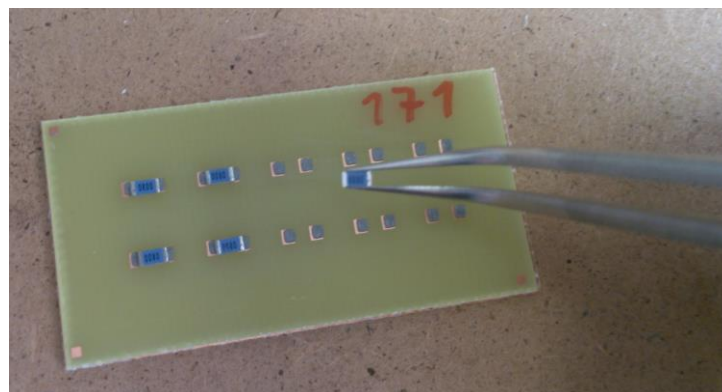
Tloušťka šablony [μm]	120	80
Základní délka otvorů [mm]	1,7	1,7
Základní šířka otvorů [mm]	0,9	0,9
Redukce délky a šířky otvorů [%]	5	10
	10	20
	20	



Obr. 3.2 Šablona pro nanesení pájecí pasty

### 3.2.2 SMD součástky

K praktické části práce byly použity SMD čipové rezistory s čistými cínovými kontakty. Odpor jednotlivých rezistorů byl  $0 \Omega$  a na každém vzorku bylo připájeno celkem deset rezistorů tohoto typu.



Obr. 3.3 Osazování vzorku č. 171 nulovými SMD rezistory

### 3.2.3 Pájecí profily

Osazené součástky na DPS byly následně pájeny procesem přetavení v horkovzdušné průběžné přetavovací peci Mistral 260. Tato pec je vybavena třemi teplotními zónami. Lze na ní přesně nastavit a sledovat teplotní profil celého pájecího procesu. Teplotu každé ze tří zón řídí procesor a lze ji sledovat na LED-displeji samotné pece nebo na připojeném počítači. Pec je na výstupu mimo jiné vybavena třemi chladicími ventilátory.

Jak je již zmíněno v prvním odstavci kapitoly 3.2, pro praktickou část byly vybrány a použity celkem dva různé teplotní profily. U prvního teplotního profilu byla teplota v první zóně pece  $170 \text{ }^\circ\text{C}$ , ve druhé  $175 \text{ }^\circ\text{C}$  a ve třetí  $273 \text{ }^\circ\text{C}$ , přičemž součástky byly po páse pece

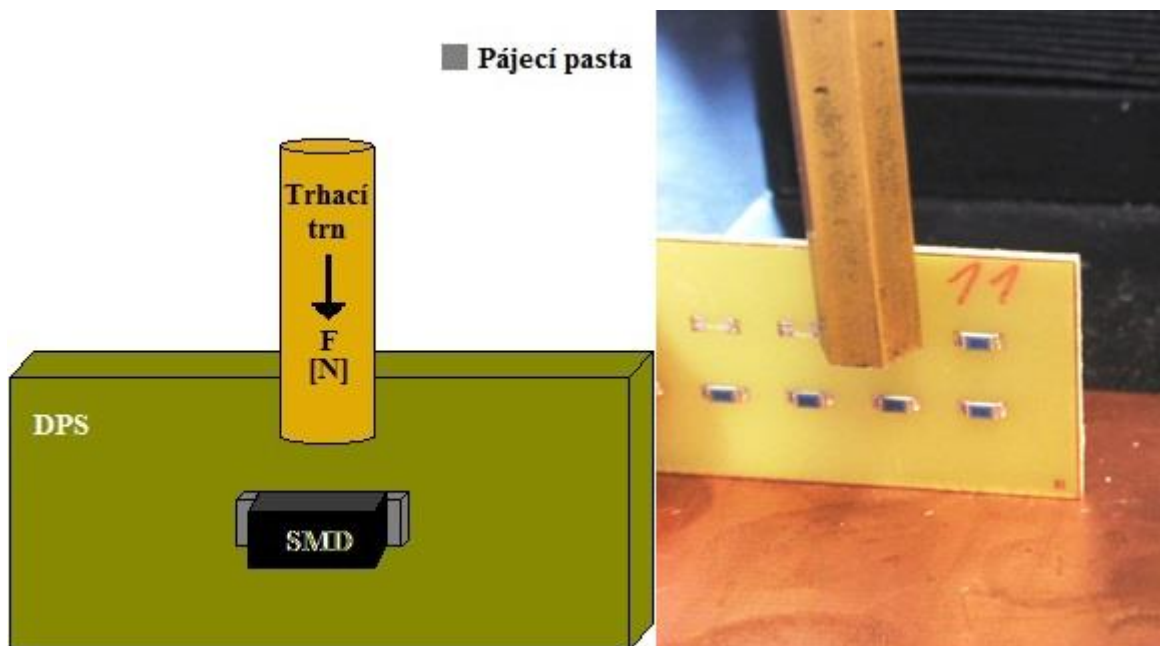
posouvány rychlostí  $28 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Nastavená teplota druhého teplotního profilu v první zóně dosahovala  $170 \text{ }^\circ\text{C}$ , ve druhé  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , ve třetí  $285 \text{ }^\circ\text{C}$  a rychlost posunu součástek byla  $30 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ .



*Obr. 3.4 Horkovzdušná přetavovací pec Mistral 260*

### **3.3 Mechanická zkouška smykem**

Mechanická pevnost pájeného spoje byla měřena pro každý z dvaceti připravených vzorků. Princip, kterým byla tato zkouška prováděna, lze vidět na Obr. 3.5. Trn testovacího stroje působí silou horizontálně na SMD součástky osazené DPS, dokud nedojde k deformaci pájeného spoje a odtržení součástky z testovacího vzorku. U testovacího stroje se před provedením testování nastavila rychlost posuvu trhacího trnu, která byla  $20 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , a podmínka ukončení testu při dosažení 70 % maximální síly. Počítač přitom zaznamenával hodnoty maximálních sil, kterých bylo dosaženo na připájené součástky během testování. Mechanická zkouška se prováděla pro všech deset součástek připájených na testovacím vzorku a změřené hodnoty maximálních sil byly následně statisticky zpracovány.



Obr. 3.5 Princip mechanické zkoušky smykem na vzorku č. 11



Obr. 3.6 Zkušební trhací stroj LaborTech



### 3.4 Naměřené hodnoty

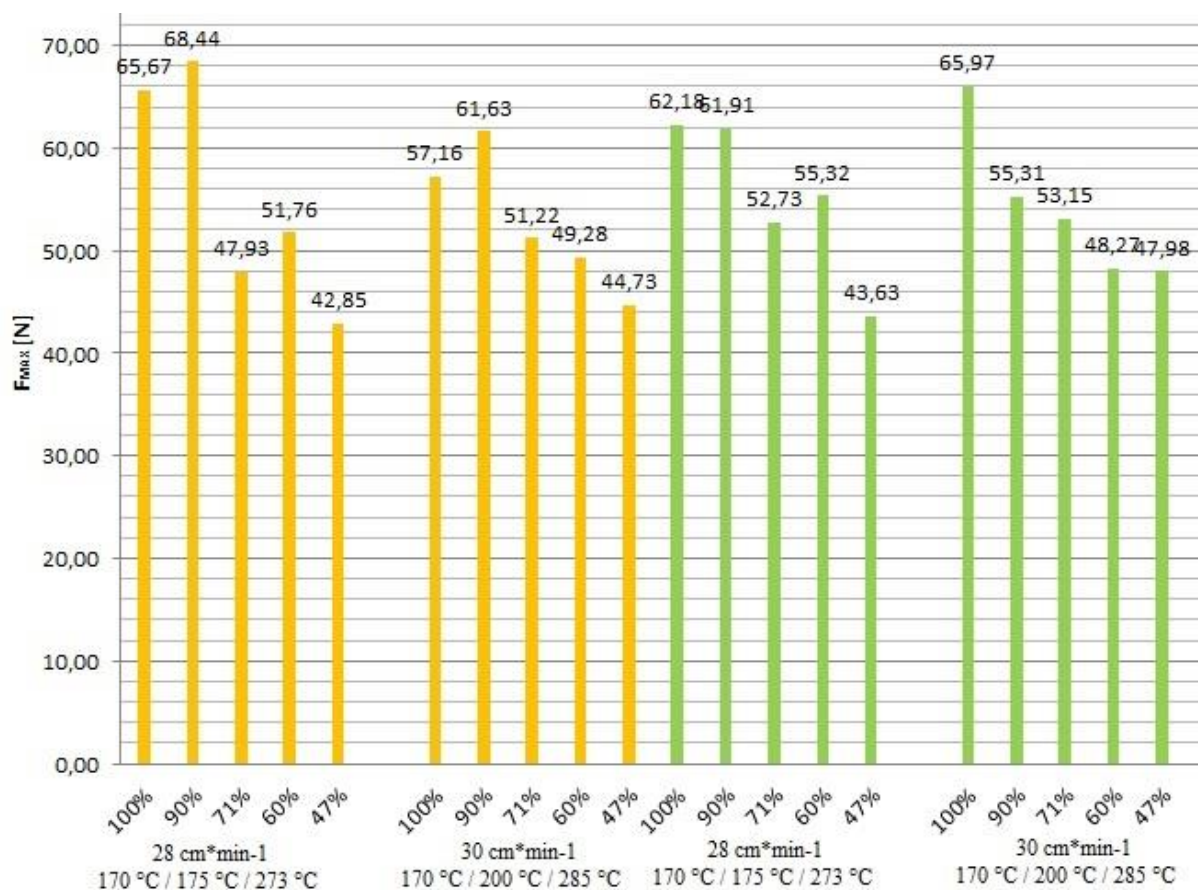
V následující tabulce jsou uvedeny kombinace použitých slitin, pájecích profilů a šablon, u nichž byla mechanická zkouška pájených spojů měřena. Na základě známých rozměrů jednotlivých otvorů šablon byl vypočítán předpokládaný objem nanesené slitiny přes jeden otvor šablony podle vzorce  $V = a \cdot b \cdot c$  (kde:  $V$  – objem,  $a$  – tloušťka otvoru,  $b$  – délka otvoru,  $c$  – šířka otvoru). V posledním sloupci tabulky je předpokládaný objem nanesené slitiny vyjádřen v procentech, přičemž hodnota s tloušťkou šablony 120  $\mu\text{m}$  a redukcí 5 % je uvažována jako 100 %.

Tab. 3.2 Schéma měřených vzorků

Typ pájecí slitiny	Pájecí profil: rychlost posuvu / 1. zóna / 2. zóna / 3. zóna [cm.min <sup>-1</sup> ; °C]	Tloušťka šablony / Redukce plošky [%]	Označení vzorku	Objem nanesené slitiny [mm <sup>3</sup> ]	Objem nanesené slitiny [%]
Cobar SAC 305 OT2	28 ; 170/175/273	120/5%	11	0,166	100
		120/10%	21	0,149	90
		120/20%	31	0,118	71
		80/10%	41	0,099	60
		80/20%	51	0,078	47
	30 ; 170/200/285	120/5%	61	0,166	100
		120/10%	71	0,149	90
		120/20%	81	0,118	71
		80/10%	91	0,099	60
		80/20%	101	0,078	47
Loctite GC10	28 ; 170/175/273	120/5%	111	0,166	100
		120/10%	121	0,149	90
		120/20%	131	0,118	71
		80/10%	141	0,099	60
		80/20%	151	0,078	47
	30 ; 170/200/285	120/ 5%	161	0,166	100
		120/10%	171	0,149	90
		120/20%	181	0,118	71
		80/ 10%	191	0,099	60
		80/20%	201	0,078	47

### 3.5 Výsledky měření

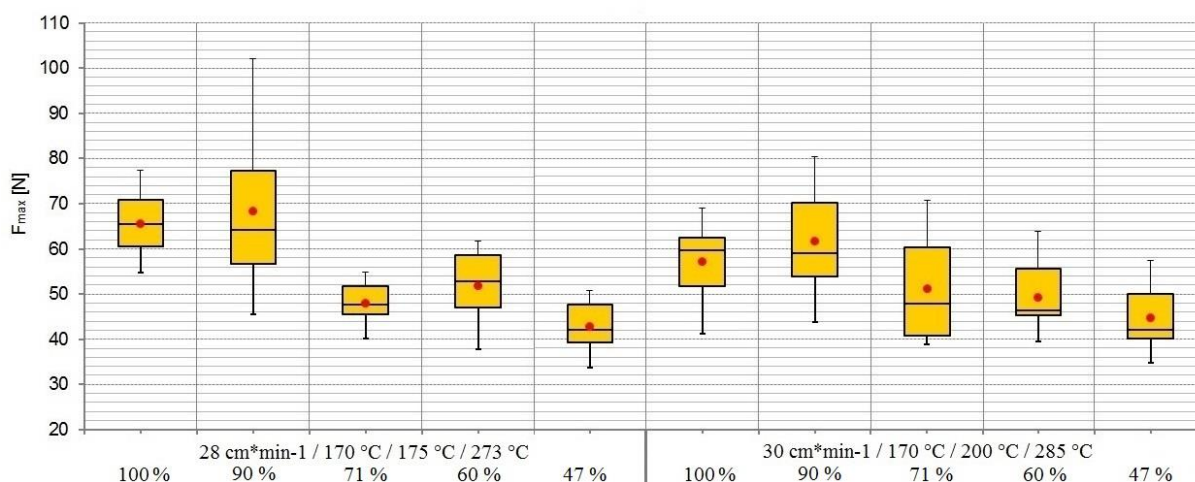
Na následujícím obrázku jsou vyneseny naměřené hodnoty sil  $F_{max}$  v grafu sloupcového charakteru. Žluté sloupce zobrazují naměřené hodnoty bezolovnaté pájecí slitiny Cobar SAC 305 OT2 a zelené sloupce slitiny Loctite GC10. Hodnota udaná nad každým sloupcem reprezentuje průměrnou hodnotu síly  $F_{max}$ , která je vyjádřena v newtonech. Hodnoty na vodorovné ose, vyjádřené v procentech, odpovídají procentuálnímu vyjádření naneseného objemu bezolovnaté pájecí slitiny, který lze vidět v Tab. 3.2. Pod hodnotami naneseného objemu v procentech je dále uveden aplikovaný profil přetavení těchto vzorků.



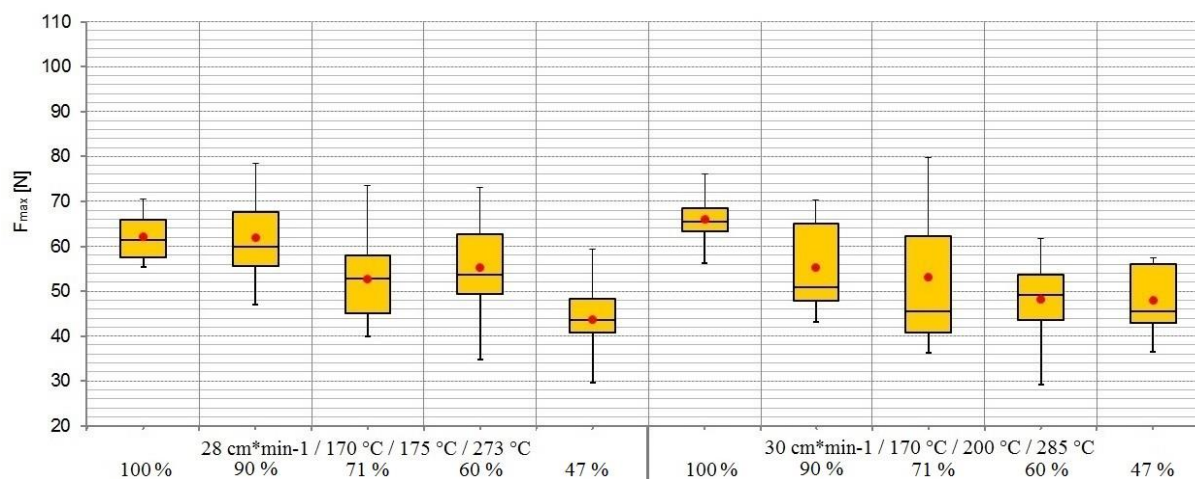
Obr. 3.7 Naměřené hodnoty vynesené v sloupcovém grafu

Hodnoty zobrazené v sloupcovém grafu na obr. 3.7 byly dále statisticky zpracovány a vyneseny v boxových grafech, které lze vidět na obr. 3.8 a na obr. 3.9. Na těchto grafech lze opět vidět naměřené hodnoty sil  $F_{max}$ , vyjádřené v newtonech, při kterých došlo k odtržení připájených součástek z daných vzorků. Jak je již zmíněno výše v kapitole 3.3,

každý vzorek tvoří celkem deset hodnot sil  $F_{max}$ . Červené body v těchto grafech představují průměrné hodnoty sil  $F_{max}$ , hladiny uvnitř obdélníků mediány, spodní hladiny obdélníků jsou rovny 25 % percentilu, horní hladiny obdélníků 75 % percentilu, dolní a horní čáry vedoucí z obdélníků minimální a maximální hodnoty sil  $F_{max}$ . Hodnoty na vodorovné ose, uvedené v procentech, opět uvádějí objem nanesené bezolovnaté pájecí slitiny na daný vzorek.



Obr. 3.8 Naměřené hodnoty pájecí slitiny Cobar SAC 305 OT



Obr. 3.9 Naměřené hodnoty pájecí slitiny Loctite GC10

Dle očekávání je z grafů patrné, že při snížení použitého množství bezolovnaté pájecí slitiny SAC klesá síla, která je potřebná k odtržení součástky. Lze vidět, že pokud se sníží množství použité slitiny více než o polovinu, poté síla potřebná k odtržení součástky klesne v některých případech o více než 20 N.

Jedním z cílů této kapitoly bylo doporučit optimální množství pájecí slitiny SAC pro testovaný typ spoje. Pro aplikace, které nejsou často vystaveny mechanickému namáhání, lze doporučit použít množství bezolovnaté pájecí slitiny SAC shodné s objemem, který byl nanesen pomocí šablony o tloušťce 80  $\mu\text{m}$  a redukce otvorů 20 %. Tímto způsobem se docílí ušetření více než poloviny pájecí slitiny při procesu pájení a mechanická pevnost pájených spojů se zhorší maximálně pouze o 35 %. Naopak pro aplikace, které jsou více zatěžovány mechanickým působením, lze doporučit použití množství bezolovnaté pájecí slitiny SAC shodné s objemem, který byl nanesen pomocí šablony o tloušťce 120  $\mu\text{m}$  a redukce 10 %. Při takovém množství budou mít pájené spoje srovnatelnou pevnost, jako při množství, které by bylo naneseno přes šablonu stejné tloušťky a redukce 5 %. Tímto způsobem by se ušetřilo 10 % pájecí slitiny. Ze získaných dat měření lze také dále tvrdit, že použité bezolovnaté pájecí slitiny Cobar SAC 305 OT2 a Loctite GC10 dosáhly téměř identických hodnot síly  $F_{\text{max}}$  při mechanické zkoušce smykem. Proto z tohoto hlediska nezáleží, jaká z těchto dvou bezolovnatých pájecích slitin se pro proces pájení použije. Tento výsledek se dal předpokládat, jelikož obě slitiny jsou typu SAC, jsou složeny ze stejného procentuálního zastoupení prvků, mají identické teploty tavení a obsahují téměř stejné procento tavidla, které zlepšuje výslednou kvalitu pájeného spoje. Stejně tak je tomu z pohledu na výběr profilu přetavení. U obou profilů vyšly velmi podobné hodnoty sil  $F_{\text{max}}$ , což je opět způsobeno stejnými typy použitých bezolovnatých pájecích slitin.

## **Závěr**

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s problematikou měkkého pájení a měření mechanické pevnosti pájených spojů. Dále navrhnout, provést a vyhodnotit experiment měření mechanické pevnosti pájeného spoje v závislosti na množství bezolovnaté pájecí slitiny typu SAC. Dalším cílem bylo provést doporučení optimálního množství zmíněné pájecí slitiny pro testovaný typ spoje.

V první kapitole byla shrnuta základní teorie bezolovnatého pájení a metod pájení. Dále zde byly řešeny pojmy životnost a spolehlivost pájeného spoje. V neposlední řadě byly v této kapitole uvedeny bezolovnaté pájecí slitiny, které se nabízejí jako alternativa za používání olovnatých pájecích slitin. Zvláštní pozornost byla v práci věnována zkouškám mechanických vlastností pájeného spoje, které jsou zahrnuty v druhé kapitole. V poslední kapitole práce je popsána realizace provedeného praktického experimentu spolu s jeho výsledky.

Pro tento experiment bylo použito celkem dvacet DPS, přičemž každá byla navržena na deset součástek 1206. Na jednu polovinu DPS bylo nanášeno různé množství bezolovnaté pájecí slitiny Cobar SAC305 a na druhou Loctite GC10, která je též typu SAC305. Osazené DPS byly následně pájeny procesem přetavení, při kterém byly použity dva různé pájecí profily. Mechanická zkouška pájených spojů byla provedena na zkušebním trhacím stroji LaborTech mechanickou zkouškou smykem.

Tímto experimentem byla ověřena hypotéza, že nanášeným různým množstvím bezolovnaté pájecí slitiny lze výrazně ovlivnit mechanickou pevnost pájených spojů. Například při použití polovičního množství pájecí slitiny poklesla mechanická pevnost o více než 20 %. Pokud se však nanášené množství slitiny snížilo pouze o 10 %, byla mechanická pevnost téměř stejná jako při nanášení plného objemu těžší slitiny. Dále se ukázalo, že u obou použitých bezolovnatých pájecích slitin i u obou pájecích profilů se dosáhlo téměř identických hodnot maximálních odtrhových sil. Obě použité pájecí slitiny SAC mají totiž velice podobné vnitřní složení a dosahují stejné teploty tavení. Realizovaný experiment potvrdil významnost faktoru množství pájecí slitiny a jeho vliv na mechanickou pevnost pájeného spoje.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ABEL, Martin a CIMBUREK, Vladimír. Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi. Vyd.1. Pardubice: ABE.TEC, 2005. 179 s. ISBN 80-903597-0-1.
- [2] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 440 s. ISBN 80-01-02392-3.
- [3] Směrnice RoHS. TME [online]. 2015 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/pages/rohs.html>
- [4] PELC, Miroslav. *Výzkum spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ivan Szendiuch.
- [5] SZENDIUCH, Ivan. *Pájení a bezolovnaté pájky* [online]. [cit. 2015-12-22]. Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [6] PÝCHA, Jan. *Studium spolehlivosti bezolovnatého pájení*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ivan Szendiuch.
- [7] MIRIC, A. Z.; GRUSD, Angela. *Lead - free alloys* [online]. [cit. 2015-12-22]. 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)
- [8] Tin-copper based solder options for lead-free assembly. In: *GLOBAL SMT a PACKAGING* [online]. 2006 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: [http://www.kester.com/kester-content/uploads/2013/03/Tin-Copper\\_Based\\_Solders-for\\_Electronic\\_Assembly.pdf](http://www.kester.com/kester-content/uploads/2013/03/Tin-Copper_Based_Solders-for_Electronic_Assembly.pdf)
- [9] SAC105 solder performs better than SAC305 in drop tests. In: *Design News* [online]. 2008 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: [http://www.designnews.com/author.asp?section\\_id=1389&doc\\_id=208997&dfpParameters=ind\\_184,bid\\_14,aid\\_208997&dfpLayout=blog](http://www.designnews.com/author.asp?section_id=1389&doc_id=208997&dfpParameters=ind_184,bid_14,aid_208997&dfpLayout=blog)
- [10] ZRUBECKÝ, Filip. *Pájecí slitiny v elektrotechnice*. Plzeň, 2015. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Martin Hirman.
- [11] JORGENSON, John D. BISMUTH. In: *USGS* [online]. 2002 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/bismuth/bismmyb02.pdf>
- [12] ŘEŘICHA, Tomáš. *Technologie elektroniky*: Prezentace ze cvičení. Západočeská univerzita v Plzni
- [13] *MONTÁŽ SMT A THT - PÁJENÍ* [online]. [cit. 2015-12-22]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/pajeni.pdf>
- [14] Dutá pájecí vlna - trysková vlna (Jet wave). In: *Kirsten* [online]. [cit. 2016-01-29]. Dostupné z: <http://www.kirsten.cz/duta-vlna.htm>

- [15] JANSA, Vojtěch. *Pevnost pájených spojů na keramických substrátech*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Martin Adámek.
- [16] MALÝ, Petr. *Měření mechanických a elektrických vlastností pájeného spoje*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Radek Polanský
- [17] ČSN IEC 50(191) (010102). *Medzinárodný elektrotechnický slovník. Kapitola 191: Spôľahlivosť a akosť služieb*. 1993.
- [18] SZENDIUCH. Solderability. *TUTORIALS WEB* [online]. 2015 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://www.tutorialsweb.com/smt/chapter4d.htm>
- [19] HARANT, Petr a František STEINER. *Testování pájitelnosti metodou smáčecích vah*. ZČU Plzeň [online]. 2007 [cit. 2015-28-11]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/xmlui/bitstream/handle/11025/392/r0c1c8.pdf?sequence=1>
- [20] STOKLASA, František. Pájecí slitiny. *COPTTEL - Elektrotechnika* [online]. 2010 [cit. 2015-11-28]. Dostupné z: <http://copttel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=6096>
- [21] LOMBERSKÝ Filip. *Spolehlivost pájených spojů*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Václav Wirth
- [22] DUSEK, Miloš.; HUNT, Christopher. Crack detection methods for lead – free solder joints [online]. 3/2004, [cit. 2016-02-07]. Dostupné z: [http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/matc164.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/matc164.pdf)
- [23] Úloha 12. Mechanické vlastnosti pájených látek (zejména kovů). *Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně* [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: [http://www.sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf/Uloha12\\_mechan\\_vl.pdf](http://www.sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf/Uloha12_mechan_vl.pdf)
- [24] ČSN EN 62137 - 1 - 5. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje - část 1 - 5: Mechanická únavová zkouška smykem. 2009.
- [25] IPC-TM-650 TEST METHODS MANUAL: Bond Strength, Surface Mount Lands Perpendicular Pull Method. 2.4.21.1. 1991.
- [26] ČSN EN 60749 - 19. Polovodičové součástky - Mechanické a klimatické zkoušky - Část 19: Zkouška pevnosti čipu střihem. 2003.
- [27] 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.
- [28] ČSN EN 62137 - 1 - 1. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje - část 1 - 1: Zkouška odolnosti proti odtržení. 2008.

- [29] ČSN EN 62137 - 1 - 3. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje - část 1 - 3: Zkouška cyklickým padáním. 2009.
  
- [30] ČSN EN 62137 - 1 - 4. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje - část 1 - 4: Zkouška cyklickým ohybem



## Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1.1 Pájený spoj [1].....	11
Obr. 1.2 Metody pájení [12].....	19
Obr. 1.3 Tvorba spoje u metody ručního pájení [13] .....	20
Obr. 1.4 Principiální zobrazení pájení vlnou [14] .....	21
Obr. 1.5 Teplotní profil a) standartní pájecí pasta b) no - clean pájecí pasta [15] .....	22
Obr. 1.6 Znázornění vlivu stárnutí a namáhání v intermetalické vrstvě Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub> :.....	24
Obr. 1.7 Faktory ovlivňující pájený spoj [1] .....	25
Obr. 1.8 Rozdělení smáčivosti povrchů podle velikosti smáčecího úhlu [20] .....	27
Obr. 1.9 Studené spoje [21] .....	28
Obr. 2.1 Mechanická únavová zkouška smykem [24].....	30
Obr. 2.2 Mechanická zkouška tahem [25].....	31
Obr. 2.3 Možné deformace při testování stříhem [27] .....	32
Obr. 2.4 Zkouška odolnosti proti odtržení [28].....	33
Obr. 3.1 Připravený vzorek č.151 pro nanesení bezolovnaté pájecí slitiny.....	36
Obr. 3.2 Šablona pro nanesení pájecí pasty .....	38
Obr. 3.3 Osazování vzorku č. 171 nulovými SMD rezistory .....	38
Obr. 3.4 Horkovzdušná přetavovací pec Mistral 260.....	39
Obr. 3.5 Princip mechanické zkoušky smykem na vzorku č. 11 .....	40
Obr. 3.6 Zkušební trhací stroj LaborTech .....	40
Obr. 3.7 Naměřené hodnoty vynesené v sloupcovém grafu.....	42
Obr. 3.8 Naměřené hodnoty pájecí slitiny Cobar SAC 305 OT .....	43
Obr. 3.9 Naměřené hodnoty pájecí slitiny Loctite GC10 .....	43
Tab. 1.1 Klasifikace tavidel dle ČSN EN ISO 29454-1 [1] .....	13
Tab. 1.2 Používané bezolovnaté pájecí slitiny [5].....	14
Tab. 1.3 Přehled vlastností prvků v bezolovnatých pájecích slitinách [6] .....	15
Tab. 3.1 Parametry šablon pro nanesení pájecí pasty.....	37
Tab. 3.2 Schéma měřených vzorků .....	41