

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

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

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Lucie DAMMEROVÁ**  
Osobní číslo: **E13B0108P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Vliv množství nízkoteplotní pájecí slitiny na mechanickou pevnost pájených spojů**  
Zadávací 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 nízkoteplotní pájecí slitiny.
4. Proveďte vyhodnocení získaných dat a doporučení optimálního množství nízkoteplotní pájecí slitiny 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

Úsek prorektora pro kvalitu a projektovou činnost


Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017

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

V Plzni dne 14. října 2016



  
Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na vliv množství nízkoteplotní pájecí slitiny na mechanickou pevnost pájených spojů. Dále jsou zde popsány nejčastěji používané testy pro zjišťování mechanické pevnosti pájených spojů. Praktická část této bakalářské práce je zaměřena na realizaci experimentu, ve kterém je změřena mechanická pevnost pájeného spoje. Použita je nízkoteplotní pájecí slitina a mechanická pevnost je měřena ve smyku.

## **Klíčová slova**

Mechanická pevnost, pájecí slitiny, pájka, pájení, nízkoteplotní pájecí slitiny, mechanická zkouška, pevnost ve smyku, DPS.

## **Abstract**

The bachelor thesis presents the influence of the amount of low-temperature solder alloy on the mechanical strength of solder joints. For the next, the thesis describes the most commonly used tests for detecting the mechanical strength of the solder joints. The practical part is focused on the implementation of the experiment, the mechanical strength of the solder joint, where is used low-temperature solder alloy and mechanical strength is measured in the shear strength test.

## **Key words**

Mechanical strength, solder alloys, solder, soldering, low-temperature solder alloy, mechanical test, shear strength, 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 vypracovala 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.

V Plzni dne 6.5.2017

Lucie Dammerová

.....

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinovi Hirmanovi za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení během dokončování práce a pomoc s experimentální částí.

Mé poděkování také patří všem, kteří mě během studia všestranně podporovali.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
1.1 PÁJENÍ .....	11
1.2 PÁJECÍ SLITINY .....	13
1.2.1 <i>Bezolovnaté slitiny</i> .....	13
1.2.1.1 <i>Nízkoteplotní slitiny</i> .....	16
1.2.2 <i>Cena a dostupnost</i> .....	17
1.3 TAVIDLA .....	18
1.4 METODY PÁJENÍ .....	20
1.4.1 <i>Ruční pájení</i> .....	20
1.4.2 <i>Pájení vlnou</i> .....	21
1.4.3 <i>Pájení přetavením</i> .....	22
1.5 MECHANICKÉ VLASTNOSTI PÁJENÉHO SPOJE .....	22
1.5.1 <i>Faktory působící na životnost spoje</i> .....	22
1.6 MECHANICKÉ ZKOUŠKY PÁJENÉHO SPOJE .....	25
1.6.1 <i>Zkouška odolnosti proti odtržení</i> .....	25
1.6.2 <i>Zkouška stříhem (smykem)</i> .....	26
1.6.3 <i>Zkouška cyklickým ohýbáním</i> .....	28
1.6.4 <i>Zkouška cyklickým padáním</i> .....	29
1.6.5 <i>Mechanická únavová zkouška smykem</i> .....	29
1.6.6 <i>Přehled českých norem</i> .....	30
<b>2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>32</b>
2.1 NÁVRH VZORKŮ A POSTUP MĚŘENÍ .....	32
2.2 POUŽITÉ PÁJECÍ SLITINY .....	33
2.3 POUŽITÉ NANÁŠECÍ ŠABLONY .....	33
2.4 OSAZOVANÉ SMD SOUČÁSTKY .....	34
2.5 PÁJECÍ PROFILY .....	35
2.6 MECHANICKÁ PEVNOST PÁJENÉHO SPOJE – ZKOUŠKA SMYKEM .....	36
2.7 ZMĚŘENÉ A ZPRACOVANÉ HODNOTY .....	37
2.8 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ .....	38
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>41</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>1</b>



## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na problematiku vlivu množství nízkoteplotní pájecí slitiny na mechanickou pevnost pájeného spoje. Elektronická zařízení jsou součástí našeho každodenního života. A technologie v tomto směru jdou neustále kupředu, trendem doby je vše zmenšovat, což klade nároky i na použité součástky takovýchto zařízení. Musí se zajistit taková technologie, která tyto nároky splňuje a dokáže všechny součástky správně propojit, aby naše elektronika fungovala.

Tím, jak se zmenšily rozměry pájených součástek, muselo dojít i k vývoji způsobu pájení elektronických zařízení. Došlo k modernizaci a nyní není problém setkat se s automatickou linkou, která takovéto miniaturní součástky osazuje bez výrazné pomoci člověka.

Práce je rozdělena na dvě části, teoretickou a experimentální. První část bakalářské práce se zabývá teorií pájení, dále jsou uvedeny metody pájení a popsány zkoušky, který slouží k zjištění mechanické pevnosti pájeného spoje. Je zde také vysvětleno, co vše ovlivňuje životnost pájeného spoje a jsou zde uvedeny i ceny některých pájecích slitin.

Experimentální část se zabývá měřením mechanické pevnosti pájeného spoje. Na vzorky je nanášeno různé množství nízkoteplotní pájecí slitiny a je testováno, jaký vliv to má na samotnou mechanickou pevnost pájeného spoje. Cílem této části je provést vyhodnocení získaných dat a doporučit optimální množství nízkoteplotní pájecí slitiny pro testovaný typ spoje.

## Seznam symbolů a zkratek

Pb .....	Chemická značka olova
Sn .....	Chemická značka cínu
Ag .....	Chemická značka stříbra
Bi .....	Chemická značka bismutu
Au .....	Chemická značka zlata
Ni .....	Chemická značka niklu
Ge .....	Chemická značka germania
Zn .....	Chemická značka zinku
In .....	Chemická značka india
Sb .....	Chemická značka antimonu
Cu .....	Chemická značka mědi
ČSN .....	Česká technická norma
DPS .....	Deska plošných spojů
EU .....	Evropská Unie
$\Omega$ .....	Ohm
$F_{\max}$ .....	Maximální síla
N .....	Newton

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Pájení

Pokud budeme mluvit o nízkoteplotních pájecích slitinách, je vhodné si nejdříve uvést, co to vlastně pájení je. Pájení je nejrozšířenější a nejoblíbenější metoda spojování součástek v elektrotechnice. Jedná se o nerozebíratelný způsob spojování dvou kusů kovu za pomoci roztaveného pomocného materiálu. Těmto snadno tavitelným materiálům se říká pájecí slitiny popř. pájky. Pájený spoj vzniká tak, že se roztaví pájecí slitina, dodá se tavidlo, které zajistí „očišťení“ pájky a pájecích ploch od oxidů, nečistot, atd. a roztavená slitina se za pomoci difuze spojí s materiálem pájecích plošek. Pro ruční pájení se používá nástroj nazývaný pájedlo, to umožňuje roztavit pájecí slitiny. S tímto druhem spojování materiálů se můžeme především setkat v elektrotechnice, dále poté například ve strojírenství a energetickém průmyslu. Tedy všude, kde je kladen důraz na mechanickou pevnost, těsnost a elektrickou vodivost. Výhod tento druh spojování má hned několik, dokáže v některých případech nahradit svařování, má velkou rozměrovou přesnost, možnost mechanizace či automatizace, lze kombinovat neželezné i železné prvky atd. Ovšem má i své nevýhody oproti například svařování: menší pevnost spojů, nevhodnost pro dlouhé spoje. [1]

**Výhody pájení:** spojení všech běžných kovů, vodotěsné spojení, tepelně a elektricky vodivé spojení, nižší teploty než např. při svařování, spojení konstrukčních součástí, které mají velké rozdíly stěn.

**Nevýhody pájení:** menší pevnost spojů (u pájení naměkko) oproti např. svařování, spoj je napadnutelný korozí, je nutná přesná příprava. [33]

Pájení se dále rozděluje na dvě podskupiny. Podle teploty tavení pájecí slitiny rozlišujeme měkké a tvrdé pájení. Měkké pájení, používáno pro montážní práce v elektronice, je charakterizováno teplotou tavení do 500 °C. Tvrdé pájení má naopak teplotu tavení vyšší než 500 °C. [2]

Pro vytvoření pájeného spoje je další důležitou věcí, na kterou se dbá pájitelnost a smáčitelnost pájených povrchů. Pájitelnost vyznačuje schopnost povrchu být smáčen pájecí slitinou během procesu pájení. Jedná se o několik vlastností, které určují vhodnost dané pájky pro průmyslové pájení. Na termín pájitelnost lze pohlížet ze dvou hledisek:

- **teplotní hledisko** (součástky musí během procesu pájení odolat pájecí teplotě, aniž by změnily požadované vlastnosti a funkci),
- **smáčivost** (povrch umožní smáčení materiálu přetavenou pájkou po dobu nutnou k vytvoření pájeného spoje). [37]

Dobrá smáčitelnost vede k vytvoření hladké, neporušené, rovnoměrné vrstvě pájecí slitiny. K ohodnocení smáčivosti slouží pojem: stupeň smáčivosti, udávající rychlost smáčení, a jak daleko se pájecí slitina rozteče. [5]

Pokud se během procesu pájení vyskytnou problémy s pájitelností, příčin může být hned několik [2]:

- **znečištění** – na základní materiál se mohou během procesu výroby a transportu dostat organické popřípadě kovové nečistoty,
- **oxidace** – nejčastější problém pájitelnosti způsobuje právě zmíněná oxidace pájené plochy. Tavidlo použité během pájecího procesu zpravidla vrstvu oxidů odstraní, ovšem pokud je tato vrstva příliš silná tavidlo ji nezvládne odstranit,
- **nesprávné spojovací metalurgie** – drahé kovy jako jsou stříbro, zlato jsou vysoce rozpustné v pájce, to vede k rozpouštění kovu kontaktů do pájecí slitiny. Takto může vzniknout velmi křehký spoj, který se ovšem na první pohled zdá být zcela v pořádku.
- **porézní povrch pájky** – pórovitost se nejčastěji vyskytuje při pokovování. Pórovitá plocha umožňuje nárůst oxidů a následuje špatná smáčivost pájených povrchů.

## 1.2 Pájecí slitiny

Pájecí slitiny mohou být hned v několika formách polotovaru: prášky, pásy, pasty, tyčinky, trubičky. Dělíme je zpravidla na dvě hlavní kategorie. A to na měkké pájky a tvrdé pájky. Takto rozděleny jsou kvůli jiným teplotám tavení.

Měkké pájky mají bod tavení do teploty 450 °C. Vyznačují se menší mechanickou pevností a jako nízkotavitelný kov se využívá cín a jeho slitiny. Přetavovací teplota je od 100 °C (pro SnIn) do 350 °C. Mechanická pevnost tohoto spoje je do 80 MPa v tahu a do 50MPa v střihu.

Tvrde pájky mají bod tavení nad 450 °C. Při použití tohoto druhu pájky se pájené spoje vyznačují vysokou mechanickou odolností. Přetavovací teplota je kolem 700 °C. Pevnost takového spoje je přes 400 MPa v tahu a cca 100-300 MPa v střihu. Nejvíce se používají slitiny stříbra, hliníku a mědi. [1]

Dále pájecí slitiny můžeme dělit například podle způsobu nanesení pájky na stykové plochy. První způsob, tedy ruční pájení, je pájení s přiváděnou pájkou, nejprve se pájené místo zahřeje na pájecí teplotu, poté se přiloží pájka a vlivem tepla součásti a zdroje tepla dojde k přetavení. Druhý způsob, pájení přetavením, je pájení s vloženou pájkou. U tohoto způsobu jsou pájené součásti zahřáty s vloženou pájkou na pájecí teplotu. Třetím způsobem, pájení vlnou, je pájení ponorem v pájecí lázni, kdy jsou pájené části ponořeny do lázně s tekutou pájkou, ty se zahřejí a pájka zaplní a utěsňuje spáry. [33]

Pájecí slitiny dále můžeme rozlišovat podle obsahu olova na olovnaté a bezolovnaté slitiny. Práce se zaměřuje pouze na nízkoteplotní bezolovnaté pájecí slitiny, to je důvod, proč zde nejsou více popsány olovnaté slitiny.

### 1.2.1 Bezolovnaté slitiny

Bezolovnaté pájky nahradily v roce 2003 ty olovnaté, jelikož Evropská Unie zakázala jejich používání i přesto se však nyní najdou výjimky, kde je používání olovnatých pájek povoleno. Tento logický krok EU byl učiněn na základě vysoké toxicity olova. U dospělých kumulace tohoto kovu může způsobit i některé druhy

rakovin. U dětí v nízkých dávkách může dojít k poruše duševního vývoje. Jako náhrada olovnatých pájek se nyní používají jiné slitiny, které kromě cínu obsahují další prvky jako zlato (ve specifických případech), zinek (používán ve velmi malém množství), stříbro, měď a další. Výhodou olovnatých pájek bylo to, že měly nízkou teplotu tání konkrétně kolem 183 °C a lepší vlastnosti pájitelnosti. U bezolvnatých pájek se teplota tání pohybuje zhruba v rozmezí 100 – 230 °C. U speciálních pájek může být teplota tání dokonce o něco nižší popřípadě vyšší cca kolem 250 °C (např. speciální pájka s obsahem india může mít teplotu tání menší než 100 °C). A samozřejmě další velkou výhodou byla jejich cena, která byla řádově mnohem nižší [2] [14]. Pro bezolvnaté pájecí slitiny je, ve většině případech, nutná přítomnost cínu (minimálně 60 %), který je doplněn drahými kovy. Do bezolvnatých slitin se využívají tyto prvky [13]:

**stříbro (Ag)** – jedná se o drahý kov, který je používán i jako složka v olovnatých pájkách, pro dobré elektrické vlastnosti se používá u bezolvnatých pájek i přes vysokou cenu, snižuje bod tání a zlepšuje smáčivost a pevnost,

**bismut (Bi)** – jde o prvek, který snižuje bod tání, smáčivost je průměrná, výhodou je také cena,

**měď (Cu)** – v elektrotechnice se jedná o hojně používaný prvek, zvláště pro výrobu vodičů, má dobrou smáčivost povrchu i mechanickou pevnost, ale jeho mínusem je, že se rozpouští v slitinách s vysokým obsahem cínu, a tím se ovlivňuje jakost spoje (zeslabení spoje, snížení pevnosti a zvýšení odporu),

**indium (In)** – využívá se ke snížení bodu tání slitiny, má teplotu tavení kolem 156 °C, plusem je dobrá smáčivost povrchu, ale jeho mechanické vlastnosti nejsou příliš vhodné pro pájení, také cena těchto pájek je vysoká, protože indium je dražší než stříbro a pro používání jako pájky je ho potřeba velké množství,

**antimon (Sb)** – zvyšuje pevnost, snižuje povrchové napětí, ale jeho velkým mínusem je to, že je částečně toxický pro lidský organismus,

**zinek (Zn)** – jedná se o prvek, který má nízký bod tání, výhodou je nízká cena, nevýhodou je, že zhoršuje smáčivost a zvyšuje oxidaci povrchu,

**nikl (Ni)** – výhoda je, že zabraňuje odsmáčení,

**germanium (Ge)** – výhodou je, že zabraňuje oxidaci.

Podle počtu prvků obsažených v pájecí slitině, rozlišujeme dvouprvkové, tříprvkové a víceprvkové slitiny.

### Dvouprvkové bezolovnaté slitiny:

- **Sn/Bi** – jedná se o slitinu s velice nízkým bodem tání. Pevná v tahu, ale na druhou stranu křehká. Vzhledem k teplotě bodu tání 138 °C je vhodná pro nízkoteplotní aplikace. Jedná se o vhodnou náhradu za olovnatou slitinu Sn/Pb. Bismut, který tato slitina obsahuje, vzniká jako vedlejší produkt po rafinaci olova, ale jelikož v celosvětovém zájmu je omezení nebo úplný zákaz používání olova v elektrotechnickém průmyslu, je budoucnost této slitiny nejasná. Nejčastěji užívanou je konkrétně slitina Bi58/Sn42. [36]
- **Sn/In** – slitina s velmi nízkým bodem tavení. Konkrétně slitina In52/Sn48 má 118 °C. Má dobrou smáčivost, avšak nevýhodou je nižší mechanická pevnost a vyšší pořizovací náklady. [6]
- **Sn/Ag** – nejrozšířenější je konkrétně slitina Sn96.5/Ag3.5, která má teplotu tavení kolem 221 °C. Jedná se o nejvhodnější alternativu olovnatých slitin. Ovšem, co se týče smáčivosti, je tato slitina označována jako jedna z horších mezi těmi, které mají vysoký podíl cínu. [6]
- **Sn/Cu** – tato pájecí slitina se nejčastěji využívá v telekomunikačním průmyslu při pájení vlnou, důvodem je nízká cena. Slitina Sn 99.3/Cu0.7 má bod tavení 227 °C, nedisponuje příliš dobrou mechanickou pevností a snadno podléhá oxidaci. Díky vyšší hodnotě tavení je vhodná do aplikací, které vyžadují vyšší pracovní teplotou. [6]

### Tříprvkové bezolovnaté slitiny:

- **Sn/Ag/Cu** – souhrnný název u těchto slitin je takzvaný SAC. Nejčastěji používaná je SAC 305 (Sn96.5/Ag3/Cu0.5) pro pájení přetavením. Tyto slitiny mají velmi podobné vlastnosti jako olovnaté slitiny Sn/Pb. Jedná se tedy o vhodnou bezolovnatou náhradu. Sn95.5/Ag4/Cu0.5 má bod tavení od 217 – 219 °C. Důvodem, proč se do slitiny Sn/Ag přidává ještě měď je, že se díky ní pomaleji rozpouští měď z DPS a součástek. Další důvod je nižší bod tavení a lepší charakteristika tečení. Vyznačuje se dobrou smáčivostí, mechanickou

pevností a je využívána jak v metodě pájení vlnou, tak přetavením i u ručního pájení. [2]

- **Sn/Ag/Bi** – do slitiny Sn/Ag se bismut přidává z toho důvodu, aby snížil teplotu tavení a zlepšil smáčitelnost. Tato slitina je vhodná pro nízkoteplotní pájení a má nejlepší pájitelnost z bezolovnatých pájek. [6]

### 1.2.1.1 Nízkoteplotní slitiny

Společně s nástupem součástek citlivějších na vyšší teplotu došlo k experimentování se slitinami s nižší teplotou tání. Nízkoteplotní slitiny se řadí do skupiny měkkých pájek a obsahují méně dostupné kovy jako bismut a indium. Mezi nízkoteplotní slitiny řadíme např. SnIn a SnBi. Jejich teplota tavení se pohybuje v rozmezí 60 – 180 °C [34]. Používají se slitiny zinku, cínu, poté již výše zmínění bismut a indium.

Tab. 1: Příklady nízkoteplotních bezolovnatých pájecích slitin [13]

Systém	Složení (hm%)	Rozsah teplot tavení (°C)
Sn-Bi	Sn-58Bi	138e
Sn-In	Sn-52In	118e
	Sn-50In	118-125
Bi-In	Bi-33In	109e

Nízkoteplotní slitiny umožňují používání jemnějšího rastru, menší rozestupy a vyšší hustotu součástek (díky nižšímu prohýbání součástek). Další jejich plus je, že se rozlévají a vzlínají velmi dobře. Spoje jsou poté velice hladké s vynikajícím smáčením. Z pájecích slitin je nejpoužívanější a nejvíce prověřená slitina BiSnAg, ta se taví při teplotě cca 138 °C [25] (např. výrobce SHENMAO Technology Inc. uvádí hodnotu 139 °C [26]) a oproti SnBi nemá tendenci vytvářet křehké spoje. Zmíněná nízkoteplotní slitina SnBi je vhodná například pro pájení miniaturních kamerových modulů na flexibilní substráty v mobilních zařízeních, tabletech atd. Tato pasta je jednou z pájecích slitin doporučených americkou Národní výrobní iniciativou (National



Manufacturing Initiative). Ovšem, pokud je pájené zařízení citlivější na smáčivost pájecí směsi, je vhodnější použít pájecí slitinu s přísadkou stříbra – BiSnAg.

Nevýhodou nízkoteplotních slitin je nižší kvalita, mechanická odolnost a tepelná odolnost spoje. Dále je celý pájecí proces velice citlivý na správnou povrchovou úpravu pájecích ploch. I přes předpovídaný vývoj těchto pájek nedošlo zatím k jejich výraznému rozšíření a v dnešní době jsou nahrazovány spíše rychle se rozšiřujícími vodivými lepidly. [34]

## 1.2.2 Cena a dostupnost

Pájky jsou většinou z větší části složeny z cínu, dále z kovů jako je: Ag, Au, Cu, Bi, Ge, Zn atd. Oproti dříve používanému olovu, se tak nezanedbatelně zvýšily výrobní ceny pájecích slitin. [4]

Ceny vybraných kovů ke dni 07.12.2016 podle serveru [www.infomine.com](http://www.infomine.com):

- cín: 433 CZK/ kg,
- stříbro: 11000 CZK/ kg,
- zlato: 858000 CZK/ kg,
- měď: 122 CZK/ kg,
- zinek: 56 CZK/ kg
- olovo: 48 CZK/kg.

V současnosti je na trhu hned několik druhů bezolovnatých pájek. Pokud po pájeném spoji vyžadujeme konkrétní vlastnosti je výběr pájecí slitiny velice důležitý. Každý uvedený prvek v názvu pájky ovlivňuje vlastnosti celé slitiny a spoje. Cena pájecí slitiny se samozřejmě odvíjí od svého složení.

Ceny vybraných bezolovnatých slitin ke dni 07.12.2016 podle serveru [www.ges.cz](http://www.ges.cz) a [hotair.cz](http://hotair.cz):

- Sn96,5/Ag3/Cu0,5: 875 CZK/ cívka 250 g,
- Sn95,5/Ag3,8/Cu0,7: 899 CZK/ cívka 250 g,

- tyčová pájka S-Sn96,5/Ag3,0/Cu0,5: 1273CZK/ tyč 1 kg,
- pájecí pasta SN100C-OT2 (T3): 1461 CZK/ kelímek 500 g,
- nízkoteplotní pájecí pasta Sn42Bi58: 2420 CZK/ kelímek 500 g,
- nízkoteplotní pájecí pasta Sn42Ag1Bi57: 2420 CZK/ kelímek 500 g.



Obr. 1: Cívka Sn/Ag/Cu [24]



Obr. 2: Pájecí pasta Sn42Bi58 [30]

### 1.3 Tavidla

Tavidlo je chemická látka, která má za úkol působit během měkkého či tvrdého pájení jako čistidlo, brání tvorbě oxidů kovů a má nám ulehčovat samotné pájení. Dále tavidlo zlepšuje pájitelnost (umožňuje, aby pájecí slitina lehce tekla po pájených plochách, místo aby tvořila kuličky). V dnešní době je na trhu hned několik druhů tavidel např. kalafuna (na bázi borovicové pryskyřice) nebo chlorid amonný. Ideální tavidlo, které je vysoce aktivní za pájecích teplot a pasivní za normálních teplot, neexistuje, proto se vždy hledá kompromis mezi těmito požadavky.

Pájecí tavidlo vybíráme pomocí několika kritérií. Pokud je kladen důraz například na [35]:

- způsob nanášení,
- pájitelnost DPS a součástek,
- vlastnosti pájecího zařízení a technologie pájení,

- lehce odstranitelné zbytky po pájecím procesu,
- splnění náročných vzhledových kritérií (minimální zbytky tavidla po pájecím procesu).

Podle normy ČSN EN 29454 tavidla dělíme na tři základní typy [7]:

- pryskyřičná,
- organická,
- anorganická.

Ty se dále dělí, viz tabulka níže.

Tab. 2: Rozdělení tavidel, norma ČSN EN 29454 [6] [7]:

<b>Klasifikace tavidla</b>		
<b>Typ tavidla</b>	<b>Základ tavidla</b>	<b>Aktivace tavidla</b>
<b>1. Pryskyřičná</b>	1. Kalafuna	1. Bez aktivátoru
	2. Nekalafunová pryskyřice	2. Halogeny
		3. Nehalogenové aktivátory
<b>2. Organická</b>	1. Vodou ředitelná	1. Bez aktivátoru
	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

Důležitým pojmem u pájecích tavidel je jejich účinnost. Ta vyjadřuje jeho schopnost podpořit smáčivost pájených povrchů. Účinnost se určuje podle schopnosti, jak dokáže kombinovat svoji aktivitu (vlastnosti čistit povrchy) a stabilitu (jedná se o čas, za kterého tavidlo stále udržuje aktivitu pájecích teplot). [2]

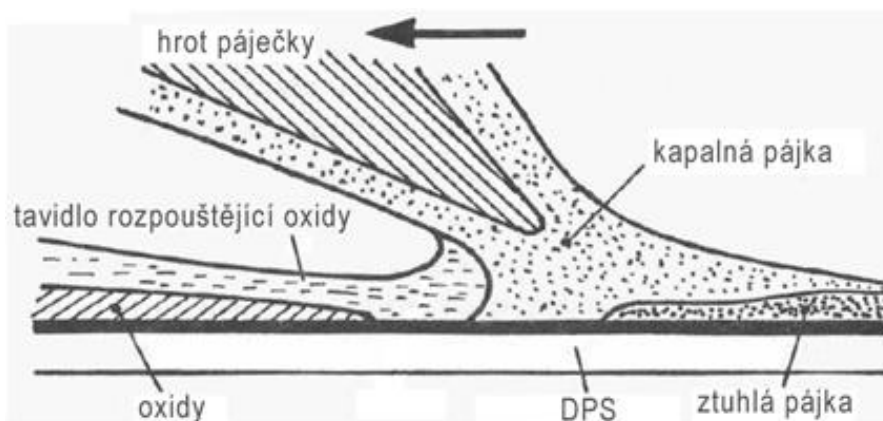
## 1.4 Metody pájení

V dnešní době se můžeme setkat s několika metodami pájení. Všechny metody mají své specifické vlastnosti a způsoby. V elektrotechnickém odvětví je, při volbě metody pájení, kladen velký důraz na cenu, způsob nanášení pájecí slitiny, samozřejmě rychlost celého procesu a v neposlední řadě kvalita výsledného spoje. Proto, aby byly splněny všechny tyto podmínky, se nejčastěji používá strojní pájení. Dříve se v průmyslu používalo pouze ruční pájení, nyní v době modernizace a zrychlování výroby jsou již průmyslové linky zautomatizovány. Což znamená, že ruční pájení se už nepoužívá v takové míře jako dříve. Samotné strojní pájení má dvě podkategorie: pájení přetavením a pájení vlnou.

### 1.4.1 Ruční pájení

První metoda, tedy ruční pájení, se používá i dnes v době automatizace. Ovšem jedná se o metodu, která není příliš spolehlivá a používá se spíše jako doplňková metoda ke strojnímu pájení. Ruční pájení se v dnešní době využívá ve výrobě, když je zapotřebí dodatečné propojení součástek, opravení chybných zapájených spojů z automatizované linky, popřípadě na některé speciální součástky a v neposlední řadě při servisních opravách zařízení.

Proces ručního pájení má několik kroků. K této metodě se používá ruční páječka, u které můžeme nastavovat požadovanou teplotu. Páječka, napájená nízkým napětím, má hrot, který je pevně spojen s rukojetí. Tento hrot se zahřívá na požadovanou pracovní teplotu. Když dojde k zahřátí hrotu, tak můžeme přejít k zahřátí zpracovávaného dílu, po celou dobu musíme mít na povrchu hrotu tenkou vrstvu pájky. Pájecí slitina ve formě trubičkové pájky je roztavená a zformuje spoj. Vše se děje za přítomnosti tavidla, které na spoj můžeme nanést před ohřevem, nebo až po ohřevu, kdy se tavidlo uvolní z dutiny v trubičce pájky. Po tomto procesu musíme být opatrní a nedovolit jakýkoli pohyb pájených částí, dokud pájka nevychladne. Proces ručního pájení je znázorněn níže na obrázku. [31]

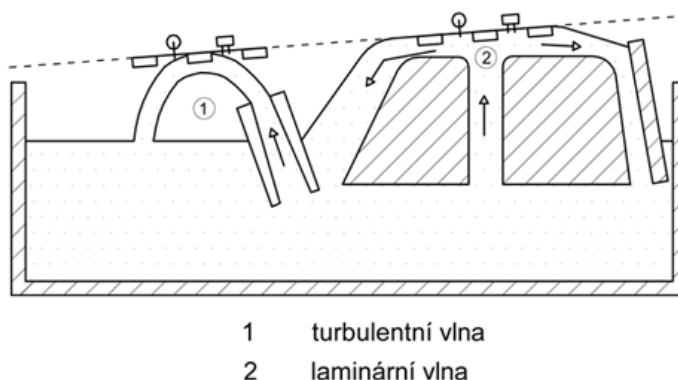


Obr. 3: Detail pájeného spoje během ručního pájení [31]

### 1.4.2 Pájení vlnou

Další metoda je strojní pájení, konkrétně pájení vlnou. Jedná se velmi rozšířenou a významnou montážní technologií v elektrotechnickém průmyslu. Samotný princip této metody spočívá v posouvání DPS po dopravníku. Během procházení nad hladinou roztavené pájky je DPS smočena vlnou roztavené pájky. Smáčena je pouze ta část desky, na které mají být vytvořeny spoje. Naopak část, která není určena k aplikaci pájky, je chráněna nepájevou maskou. Při tomto procesu můžeme využít: jednoduchou vlnu, dvojitou vlnu popřípadě selektivní vlnu. [31]

Pokud chceme vytvořit jakostní spoj, doporučuje se použít dvojitá vlna. Obě vlny by měly být blízko sebe. První vlna se jmenuje turbulentní, jejím cílem je nanesení dostatečného množství cínu. Druhá vlna tzv. laminární popřípadě klidná, má za úkol provést kosmetické úpravy spoje. Délka pobytu na turbulentní vlně ku laminární vlně je 1:4. [32]



Obr. 4: Proces pájení vlnou – dvojitá vlna. [31]

### 1.4.3 Pájení přetavením

Další strojní metodou pájení je pájení přetavením. Tato metoda má dva hlavní kroky. Prvním je nanesení pájecí pasty na plošky DPS. Poté, co se plošky substrátu osadí součástkami, může se přejít k druhému kroku - zapájení. K tomu dojde za pomoci přetavení při teplotě, která je vyšší než bod tání pájecí pasty. Musíme mít předem definovaný teplotní profil. Druhy pájení metodou přetavení [31]:

- pájení v parách,
- pájení infračerveným zařízením,
- přetavení nuceným prouděním.

Pájka ve formě pasty se může nanášet na DPS dvěma způsoby. Prvním způsobem je nanášení dávkováním (může být ruční či strojní dávkovač) a druhým je nanášení sítotiskem nebo šablonovým tiskem (pájecí pasta je vtlačována přes otvory těrkou). [5]

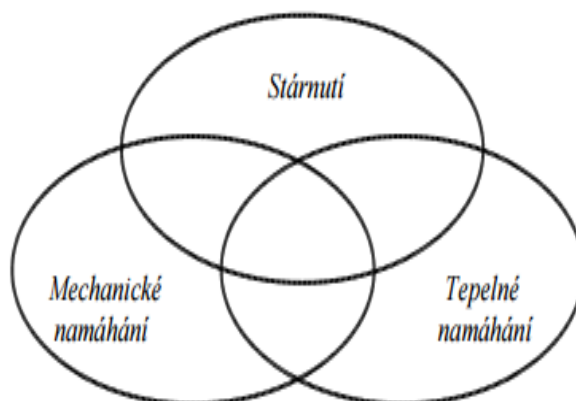
## 1.5 Mechanické vlastnosti pájeného spoje

Vlastnosti pájeného spoje lze posuzovat podle několika kritérií. Například jaká je teplotní, mechanická odolnost spoje na působící vnější faktory atd. Dobrá mechanická odolnost je naprosto zásadní pro určení kvality pájeného spoje. Během životnosti spoje na něj působí několik negativních aspektů, a i přesto by měla být zachována dobrá elektrická vodivost a jeho pevnost pro kvalitní funkčnost. Proto se v dnešní době velice dbá na to, aby pájené spoje byly udělány co nejdokonaleji, co nejkvalitněji.

### 1.5.1 Faktory působící na životnost spoje

Životnost jakéhokoliv výrobku je obecně definována jako doba, za kterou se předmět opotřebuje tolik, že už nemůže plnit svoji původní funkci. Faktorů, které ovlivňují životnost pájeného spoje, je několik. Mezi základní faktory patří [8]:

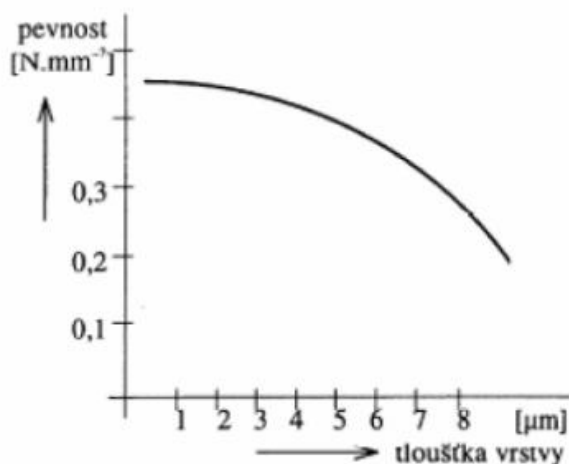
- stárnutí materiálů,
- mechanické namáhání,
- teplotní namáhání.



Obr. 5: Faktory ovlivňující životnost pájeného spoje [8]

Nyní si každý faktor ovlivňující životnost pájeného spoje blíže rozebereme a uvedeme, jak spolu všechny souvisí.

Stárnutí materiálu je významným způsobem ovlivněno tvorbou difúzní vrstvy. Difúze materiálu se projevuje vznikem a následným nárůstem takzvaných intermetalických slitin. Vznik této vrstvy je při vytvoření spoje nezbytným průvodním jevem. Ovšem intermetalické slitiny postupem času a teplotním namáháním narůstají. Tloušťky této vrstvy se běžně pohybují v mikrometrech, ale mohou narůstat i na několik desítek mikrometrů. Čím silnější jsou, tím poté spoj ztlačně zhoršuje své mechanické a elektrické vlastnosti až dojde k tomu, že přestane plnit svoji požadovanou funkci. [8] [10]



Obr. 6: Závislost pevnosti spoje na tloušťce difúzní vrstvy [15]

Dalším faktorem je mechanické namáhání, které způsobuje únavu materiálu spoje. Mechanické namáhání dělíme na dva základní typy a to: externí a interní. Externí mechanické namáhání znamená, že na spoj působí faktory zvenčí jako např. vibrace. Avšak interní namáhání je zapříčiněno změnami vnitřních poměrů spoje např. tepelné namáhání (dochází k roztažnosti materiálu). [8] [3]

Posledním důležitým faktorem je tepelné namáhání. Působení tepla na pájený spoj vyvolá jevy, které jsou vratné (změny rozměrů atd.) nebo nevratné (např. stárnutí materiálu díky změně struktury). Toto namáhání může být způsobeno vlivem okolí (např. aplikace v topných domácích elektrospotřebičích jako jsou přímotopy), nebo vznikne v obvodu jako vedlejší produkt. [8] [10]

Jestliže je pájený spoj vystaven současně těmto třem faktorům, dojde k jeho selhání mnohem dříve, než kdyby byl tento spoj namáhán zvlášť pouze jedním z uvedených.

V dnešní době se v elektrotechnice snažíme o co nejlepší a nejodolnější spoje, avšak musíme brát v potaz hned několik kritérií, které určují, jak kvalitní spoj ve výsledku bude. Výsledná jakost pájeného spoje záleží hned na několika kritériích, konkrétně těchto čtyřech [8] [9]:

- **pájka** - čistota
  - složení
  - tavidlo
  
- **materiál pájecích ploch** – čistota
  - složení
  - povrchová úprava
  
- **geometrie pájecích ploch** – umístění na substrátu
  - velikost
  - tvar
  
- **teplotní profil** – doba pájení
  - rychlost pájení atd.



Odhad životnosti pájeného spoje je ovlivňován několika faktory a z tohoto důvodu ho není vždy jednoduché určit. Mezi hlavní vlivy patří, vlivy působící na spoj během výrobního procesu, tj. kvalita jeho provedení, dále také vlivy výkonového zatížení spoje a vlivy prostředí, zejména teplota, vlhkost, mechanické zatížení, atd. [12]  
[2]

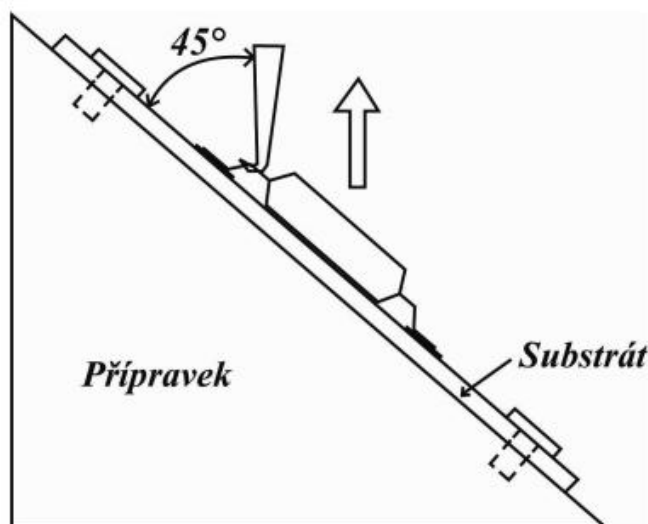
## 1.6 Mechanické zkoušky pájeného spoje

Pájené spoje se testují hned několika testy: mechanické, optické a elektrické [11]. Testování se provádí 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. Všechny mechanické zkoušky jsou destruktivní a mohou vést ke zničení spoje nebo spojovaných dílů a součástek [12]. Vzhledem k zadání bakalářské práce se zaměříme pouze na mechanické zkoušky, konkrétně především na zkoušku ve stříhu neboli smyku, která je v praktické části využívána pro testování mechanické pevnosti pájeného spoje.

### 1.6.1 Zkouška odolnosti proti odtržení

Tento typ zkoušky je uveden v normě ČSN EN 62137 – 1 – 1. Součástka je během testování pod úhlem 45°. Při teplotním cyklování norma doporučuje cyklování v rozmezí teplot od -40 až do +125 °C, kdy změna teploty od spodní hranice po horní trvá 30 minut [16]. Během této destruktivní zkoušky může dojít k těmto poruchám [12]:

- odtržení vývodu od součástky,
- odtržení mezi intermetalickou vrstvou,
- utržení celého pájeného spoje od kontaktní plošky.

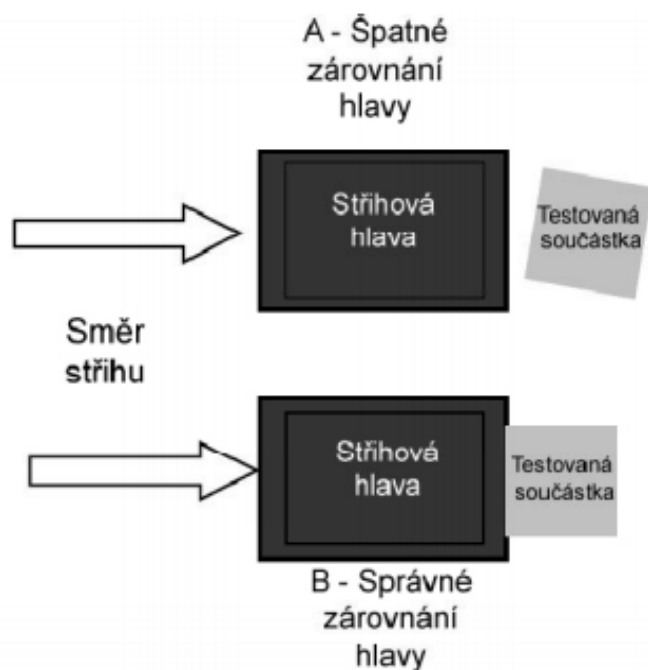


Obr. 7: Zkouška odolnosti proti odtržení [16]

### 1.6.2 Zkouška stříhem (smykem)

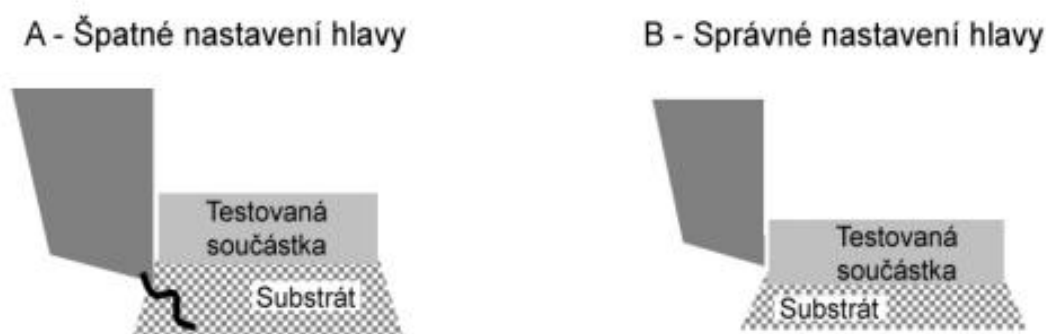
Tato zkouška je popsána pro měkké pájky normou ČSN EN 60749 – 19 a normou ČSN EN 62137 – 1 – 2. Pro tvrdé pájky potom normou ČSN EN 12797. Zjišťuje se síla, která je potřebná k odtrhnutí součástky v pájeném spoji. Tato výsledná síla je závislá na typu použité pájky a výskytu trhlin, které vznikly při přetavení [3].

Tento typ mechanické zkoušky se většinou provádí při pokojové teplotě, tedy kolem 23 °C, ale někdy se může provádět i při zvýšených/snížených teplotách nebo po teplotním cyklování (normou ČSN EN 62137 – 1 – 2 doporučeno od -40 do +125 °C, přičemž změna teploty od spodní hranice po horní trvá 30 min). Ovšem po skončení teplotního cyklování se může provádět zkouška stříhem až po 4 hodinách. Stříhová hlava musí být rovnoběžně se zkoušenou součástkou. Pro ilustraci obrázek 8 níže. Pokud ji špatně nastavíme, tak získáme nepřesné výsledky, protože bude docházet k předčasnému popraskání pájeného spoje, anebo bude trhací stroj působit na jiné místo úplně jinou silou. Což je pro nás také nežádoucí. [12] [17] [18]



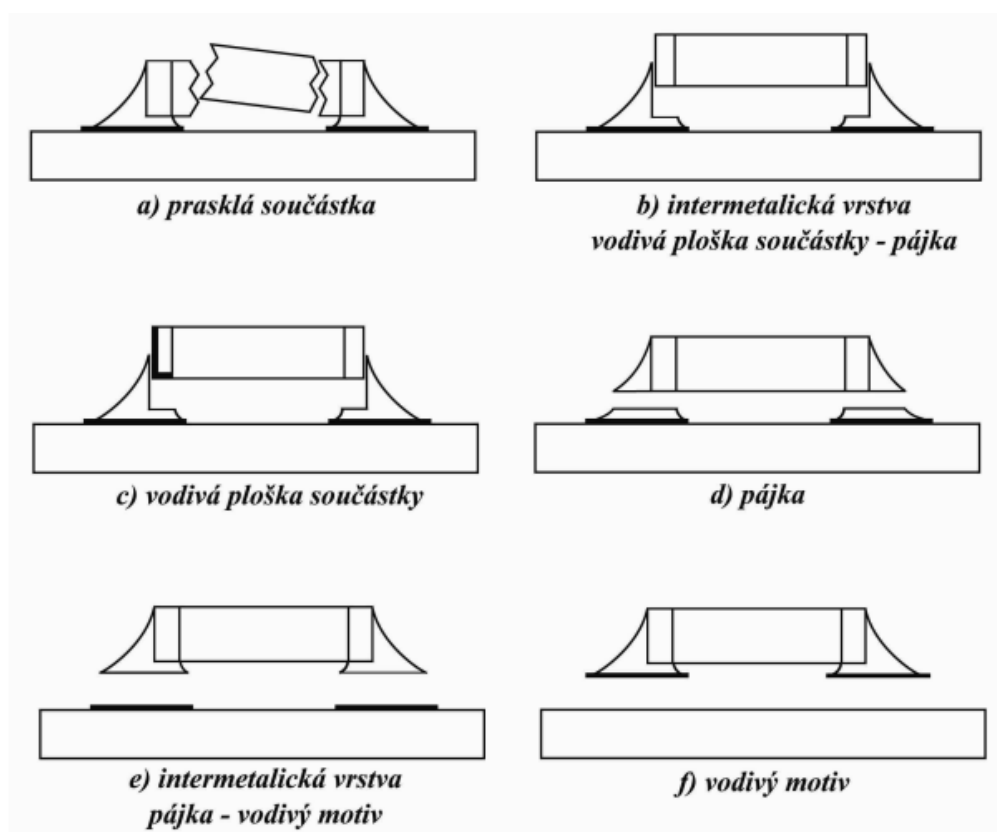
Obr. 8: Správné zarovnání stříhové hlavy během testování [19]

Další špatné vyhodnocení výsledků pevnosti pájeného spoje můžeme získat, pokud špatně nastavíme výšku stříhové hlavy. Podle normy je nutno, aby hlava tlačila do  $\frac{3}{4}$  výšky zkoušené součástky. To je jediný způsob, jak docílíme, že stříhová hlava bude působit na největší možnou plochu součástky a přitom nedojde k tomu, aby hlava sjela po desce, viz obrázek 9 níže. [3]



Obr. 9: Správné nastavení výšky stříhové hlavy u trhacího stroje [19]

Na obrázku níže (Obr. 10) můžeme vidět různá místa, kde může dojít k odtržení při zkoušce stříhem (smykem).



Obr. 10: Místa odtržení při zkoušce stříhem (smykem) [17] [12]

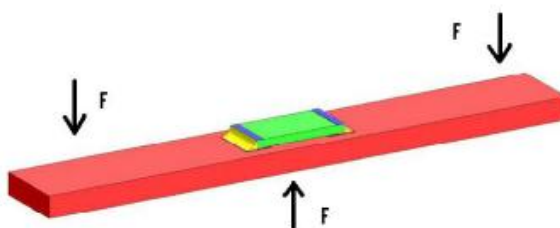
Dále se u této zkoušky také nastavuje rychlost stříhové hlavy. Doporučený posuv je od 0,5 do 9 mm/min. Samozřejmostí je pečlivé upevnění substrátu, aby nedošlo k jeho posunu. [3] [17]

### 1.6.3 Zkouška cyklickým ohýbáním

Princip této mechanické zkoušky je definována normou ČSN EN 62137 – 1 – 4. V praxi se používá např. ke sledování mechanického namáhání tlačítek u mobilních zařízení. [20]

Ke zkoušce tohoto typu je zapotřebí přípravek, který je opatřen dvěma hroty na koncích a jedním uprostřed. Prostřední působí na střed testovaného substrátu, ale silou opačně působící než krajní hroty, což způsobí ohyb desky. Přípravek na testování je zachycen na obrázku 11. Měří se elektrický odpor a okamžik přerušení (10 až 100  $\mu$ s). Doporučována rychlost prohýbání je 0,5 mm/s, maximální průhyb desky je 1 až 4 mm (volí se dle předběžné zkoušky pro každou desku). Záznamové zařízení udává sílu,

posuv a počet cyklů. [3] [20]



Obr. 11: Princip zkoušky cyklickým ohýbáním [21]

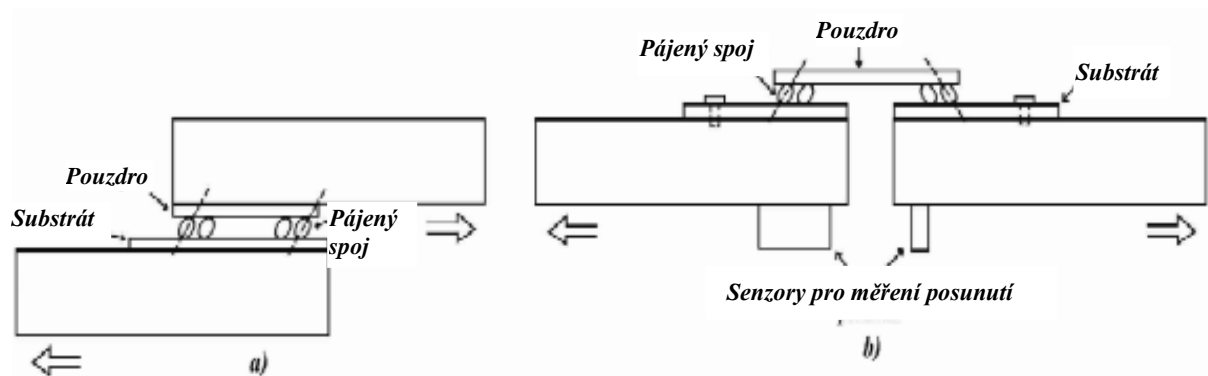
#### 1.6.4 Zkouška cyklickým padáním

Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 62137 – 1 – 3. U tohoto testování se vzorek umístí do přípravku, který stále dokola simuluje pád z výšky. Běžně se používají výšky 0,75 a 1,5 m. Na povrch vzorku se umístí tenzometr, který měří tlak na povrchu testované desky. Během testu je vzorek připojen k zařízení, které má za úkol sledovat, zda nedošlo k elektrickému přerušení (schopno zaznamenat přerušení do 100  $\mu$ s). Příklady přerušení, ke kterým může během zkoušky dojít [12] [22]:

- trhlinka v pájce,
- trhlinka v pokoveném otvoru,
- přerušení povrchového pokovení.

#### 1.6.5 Mechanická únavová zkouška smykem

Tuto zkoušku popisuje norma ČSN EN 62137 - 1 – 5 a je určena pro součástky typu BGA (pouzdra s kulovými vývody). Testuje se pomocí teplotního nebo mechanického cyklování. K vykonání zkoušky je opět zapotřebí přípravku, na kterém musí být možnost nastavení rozsahu ( $\pm 0,001$  až  $\pm 0,1$  mm) a rychlost posunutí (0,001 až 0,01 mm/s). Spoj je během zkoušky opakovaně zatěžován smykovou silou. Test končí selháním spoje, což znamená, že se opět jedná o destruktivní zkoušku. Přístroj po dokončení testu dokáže ukázat počet cyklů. Na obrázku 12 můžete vidět dvě možnosti únavové zkoušky smykem. [3] [23]



Obr. 12: Princip mechanické únavové zkoušky smykem [23]

### 1.6.6 Přehled českých norem

V této podkapitole uvádím přehled několika používaných českých norem pro testování mechanických vlastností pájeného spoje. [3]

- **ČSN EN 62137 – 1 – 1. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje: Zkouška odolnosti proti odtržení.** Určena pro povrchově montované součástky, kde hodnotí mechanickou odolnost mezi součástkou a substrátem pomocí mechanického namáhání v tahu.
- **ČSN EN 62137 – 1 – 2. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje: Zkouška pevnosti ve smyku.** Určeno pro povrchově montované součástky a konektory.
- **ČSN EN 62137 – 1 – 3. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje: Zkouška cyklickým padáním.** Určeno pro povrchově montované součástky. Hodnotí pevnost pájených spojů větších součástek a dalších komponentů.
- **ČSN EN 62137 – 1 – 4. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje: Zkouška cyklickým ohybem.** Určeno pro povrchově montované součástky. Pomocí cyklického ohýbání se hodnotí pevnost pájených spojů mezi vývody součástek a ploškami na substrátu.
- **ČSN EN 62137 – 1 – 5. Technologie povrchové montáže - Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje: Mechanická únavová zkouška smykem.** Určeno pro povrchově montované součástky. Po povrchové montáži

součástky se provádí cyklická mechanická smyková deformace pájených spojů.

- **ČSN EN 62137-3 Technologie montáže elektroniky - Část 3: Směrnice pro volbu metod zkoušek vlivu prostředí a zkoušek trvanlivosti pro pájené spoje.** Tato směrnice popisuje, jak vybrat metodu pro zkoušení spolehlivosti pájených spojů.

- **ČSN EN 60068-2-58 ed. 2 Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-58: Zkoušky - Zkouška Td: Metody zkoušení součástek pro povrchovou montáž (SMD) - pájitelnost, odolnost proti rozpouštění metalizace a proti teple při pájení.** Tato norma udává odolnost bezolovnatých pájecích slitin proti teple při pájení a odolnost proti rozpouštění metalizace.

- **ČSN EN 60068-2-69 ed. 2 Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-69: Zkoušky - Zkouška Te: Zkoušení pájitelnosti elektronických součástek pro technologii povrchové montáže (SMD) metodou smáčecích vah.** Pomocí metodou smáčecích vah určuje pájitelnost vývodů součástek pro povrchovou montáž.

- **ČSN EN 60068-2-77. Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-77: Zkoušky - Zkouška 77: Pevnost těla součástky a zkouška úderem.** Cílem této zkoušky je zjistit mechanické namáhání SMD součástky během montáže a po ní.

- **ČSN EN 60749 – 19 Polovodičové součástky - Mechanické a klimatické zkoušky - Část 19: Zkouška pevnosti čipu stříhem.** Není vhodná pro zkoušení čipové plochy větší než 10 mm<sup>2</sup>. Metoda je založena na měření síly působící na čip a zaznamenání poruchy.

- **ČSN EN 60749-22 Polovodičové součástky - Mechanické a klimatické zkoušky - Část 22: Pevnost spoje.** Cílem této zkoušky je změřit pevnost spoje, popřípadě stanovit požadavky na pevnost spojů.

## 2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Úkolem experimentální části této bakalářské práce bylo zjistit, jaký vliv má rozdílné množství nízkoteplotní pájecí slitiny na mechanickou pevnost pájeného spoje. Pro zjišťování mechanické pevnosti spoje byla vybrána mechanická zkouška smykem. Všechna měření byla provedena v laboratořích Katedry technologií a měření, Fakulty elektrotechnické na Západočeské univerzitě v Plzni. Veškeré přístroje a potřebné materiály k provedení této experimentální části poskytla výše zmíněná Katedra technologií a měření.

### 2.1 Návrh vzorků a postup měření

Pro měření bylo použito dvacet desek plošných spojů (DPS), které musely být nejprve ze všeho očištěny kancelářskou gumou od povrchových oxidů. Následovalo zvážení každé DPS na váze RADWAG XA 52/2X, pro zjištění kolik bylo nanášeno pájecí pasty na substrát. Nyní se na DPS mohla nanést pomocí třerky a šablony jedna ze dvou druhů pájecích past. Následovalo opětovné zvážení. Poté se všech dvacet DPS ručně osazovalo součástkami, každá byla osazena deseti kusy. V dalším kroku se mohlo přejít k pájení DPS pomocí procesu přetavení v přetavovací peci Mistral 260, použity byly dva teplotní profily. Po tomto kroku se všechny vzorky ponechaly vychladnout v pokojové teplotě. Posledním krokem bylo podrobit vyrobené vzorky zkoušce mechanické pevnosti pájených spojů. Ta byla zrealizována na trhacím stroji, který rovnou zaznamenával odtrhovou sílu potřebnou k odtržení připájené součástky.



Obr. 13: Všech dvacet DPS po nanesení pájecí pasty, vzorek č.11 již i osazen součástkami



## 2.2 Použité pájecí slitiny

Použité byly dvě různé nízkoteplotní pájecí slitiny, jak již bylo zmíněno výše. První byla pájecí pasta PF 602-P30 s označením Sn42Bi58. Výrobce je firma SHENMAO Technology Inc. Slitina dosahuje bodu tání 139 °C a hmotností procentuální zastoupení prvků této pasty je Sn 42 % a Bi 58 %. Velikost částic (zrn) je 20-45  $\mu\text{m}$  a objem této slitiny je tvořen z 89,5 % kovovou složkou a 10,5 % tavidlem [26]. Druhou použitou pájecí slitinou pro tento experiment byla slitina Cobar BSA04-XSP, která má bod tavení 138 - 142 °C. Výrobce doporučená maximální přetavovací teplota je 170 – 180 °C. Jedná se o výrobek německé společnosti Balver Zinn Josef Jost GmbH & Co. KG. Hmotností procentuální zastoupení jednotlivých prvků této pájecí slitiny je Bi 57,6 %, Sn 42 % a Ag 0,4 % a velikost částic (zrn) je 25 - 45  $\mu\text{m}$ . Tato slitina obsahuje 89,8 % kovové složky a 10,2 % tavidla [27]. Obě pájecí pasty se nanášely pomocí těrky na očištěné DPS přes dvě rozdílné šablony.



Obr. 14: Vlevo pájecí pasta Cobar BSA04-XSP, napravo pájecí pasta PF 602-P30 (Sn42Bi58)

## 2.3 Použité nanášecí šablony

Pro experiment byly použity dvě šablony, které měly rozdílné tloušťky. Tloušťka první šablony byla 120  $\mu\text{m}$  a tloušťka druhé 80  $\mu\text{m}$ . Rozměry otvorů byly – délka

otvoru 1,7 mm a šířka 0,9 mm. Což jsou rozměry, které odpovídají velikosti pájecích plošek pro SMD součástky – konkrétně typ 1206. Každá šablona obsahovala tři redukované rozměry otvorů. Redukované byly rozměry – základní šířka a délka otvoru. Oproti rozměrům otvorů základního profilu se jednalo o 5, 10, 20 % redukci. Pro lepší přehled, které profily a redukce byly pro experiment použity, byla vytvořena tabulka níže. (Tab. 3)

Tab. 3: Použité šablony a jejich parametry

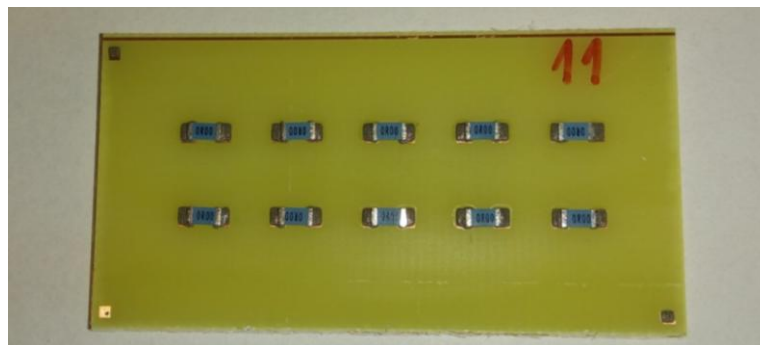
	Šablona 1	Šablona 2
<b>Tloušťka šablony [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	120	80
<b>Základní šířka otvorů [mm]</b>	0,9	0,9
<b>Základní délka otvorů [mm]</b>	1,7	1,7
<b>Redukce otvorů [%]</b>	5	-
	10	10
	20	20



Obr. 15: Jedna z šablon, která slouží k nanášení pájecí pasty na DPS

## 2.4 Osazované SMD součástky

Každá DPS byla pro experiment osazována deseti kusy SMD čipového rezistoru s čistými cínovými kontakty. Odpor každého použitého rezistoru byl  $0 \Omega$ .



Obr. 16: Vzorek č.11 osazený deseti SMD rezistory

## 2.5 Pájecí profily

Poté, co byly všechny DPS osazeny SMD rezistory, se mohlo přejít k samotnému pájení. Pájelo se procesem přetavení v horkovzdušné peci značky Mistral 260. Na peci lze přesně nastavit teplotní profil a lze aktuální teplotu sledovat na displeji. Dále má pec tři teplotní zóny a na výstupu je vybavena třemi ventilátory, které mají sloužit k chlazení vzorků.

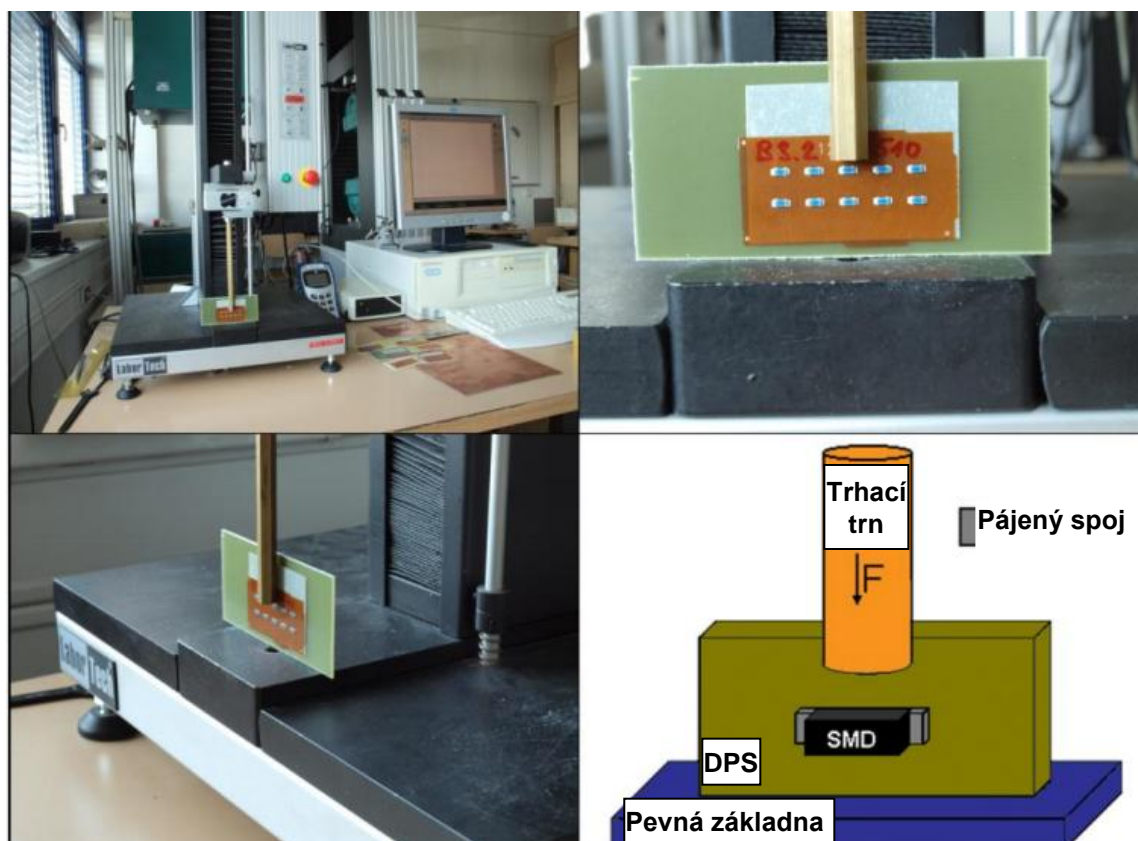
V kapitole 2.1 bylo uvedeno, že pro experimentální část byly použity celkem dva teplotní profily. U prvního byla teplota v první zóně pece 100 °C, v té druhé 140 °C a v poslední, tedy třetí zóně 220 °C. Rychlost pásu, po které byly vzorky posouvány, byla 45 cm/min. U druhého teplotního profilu byla teplota první zóny 90 °C, druhá zóna dosahovala hodnoty 130 °C a třetí 210 °C. Rychlost posunu vzorků v tomto případě byla 35 cm/min. Obrázek pece níže. (Obr. 17)



Obr. 17: Použitá horkovzdušná pec Mistral 260 (obrázek převzat z [28])

## 2.6 Mechanická pevnost pájeného spoje – zkouška smykem

Mechanická pevnost pájeného spoje byla zjišťována u všech dvaceti vzorků, které jsme si předem vyrobili. K otestování vzorků jsme použili zkoušku smykem. Samotný princip, jak trhací zařízení funguje, můžete vidět níže na obrázku č. 18.



Obr. 18: Zkušební trhací stroj LabTech a princip mechanické zkoušky smykem [29]

Princip mechanické zkoušky smykem je ten, že trn trhacího stroje LabTech působí horizontální silou na osazené součástky na DPS. Zkouška končí po deformaci pájeného spoje a následného odtržení SMD součástky od DPS. Před začátkem testování vzorků se nastavila na trhacím stroji rychlost posuvu trnu – 20 mm/min. Následně se také nastavila podmínka ukončení zkoušky – dosažení 70% maximální působící síly. Během celé zkoušky počítač ukládal hodnoty maximálních působících sil, které byly zapotřebí k odtržení SMD součástek. Uvedená zkouška se prováděla pro všech deset připájených rezistorů na desce plošných spojů. Zaznamenané hodnoty byly následně dále zpracovány.

## 2.7 Změřené a zpracované hodnoty

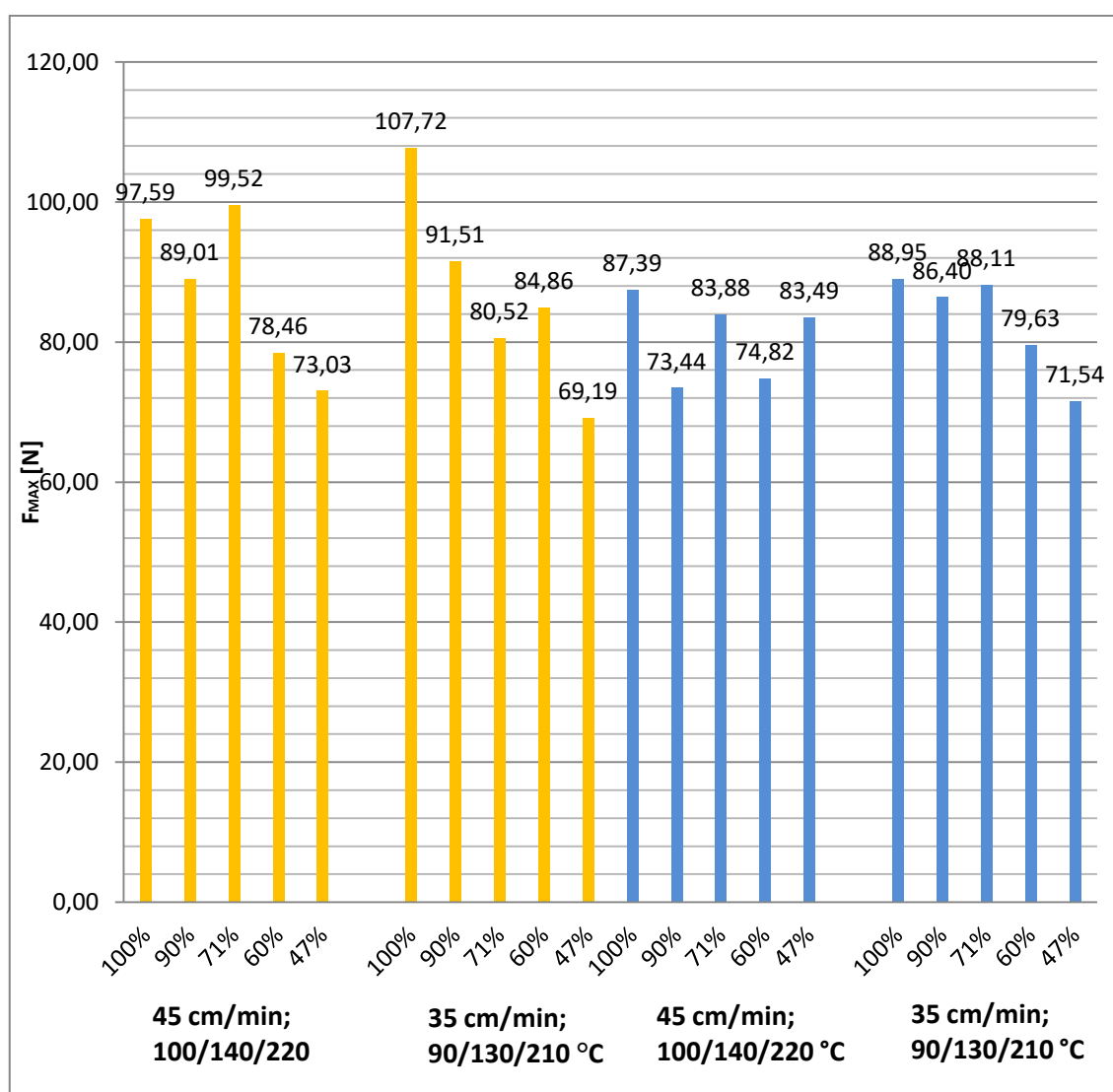
Pro přehlednost změřených hodnot poslouží uvedená tabulka. Můžete zde vidět všechny použité kombinace, které byly pro experiment změřeny. Dále byl vypočítán objem nanesené pasty podle vzorce  $V = a \cdot b \cdot c$ , kde:  $V$  – objem,  $a$  – výška otvoru,  $b$  – délka otvoru,  $c$  – šířka otvoru. Jako tloušťka otvoru byly uvažovány hodnoty 120  $\mu\text{m}$  nebo 80  $\mu\text{m}$ , délka otvoru 1,7 mm a šířka otvoru 0,9 mm. V posledním sloupci byly hodnoty objemu nanesené hmoty přepočítány na procenta, přičemž tloušťka šablony 120  $\mu\text{m}$  a redukce 5 % byla brána jako 100 %.

Tab. 4: Parametry měřených vzorků

Pájecí pasta	Přetavovací profil: rychlost posuvu; zóna 1/ zóna 2/ zóna 3 [cm/min; °C]	Tloušťka šablony; redukce [ $\mu\text{m}/\%$ ]	Číslo vzorku	Vypočítaný teoretický objem nanesené pasty [mm <sup>3</sup> ]	Vypočítaný teoretický objem nanesené pasty [%]
PF602-P30	45; 100/140/220	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
	35; 90/130/210	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
BSA04-XSP	45; 100/140/220	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
	35; 90/130/210	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

## 2.8 Vyhodnocení měření

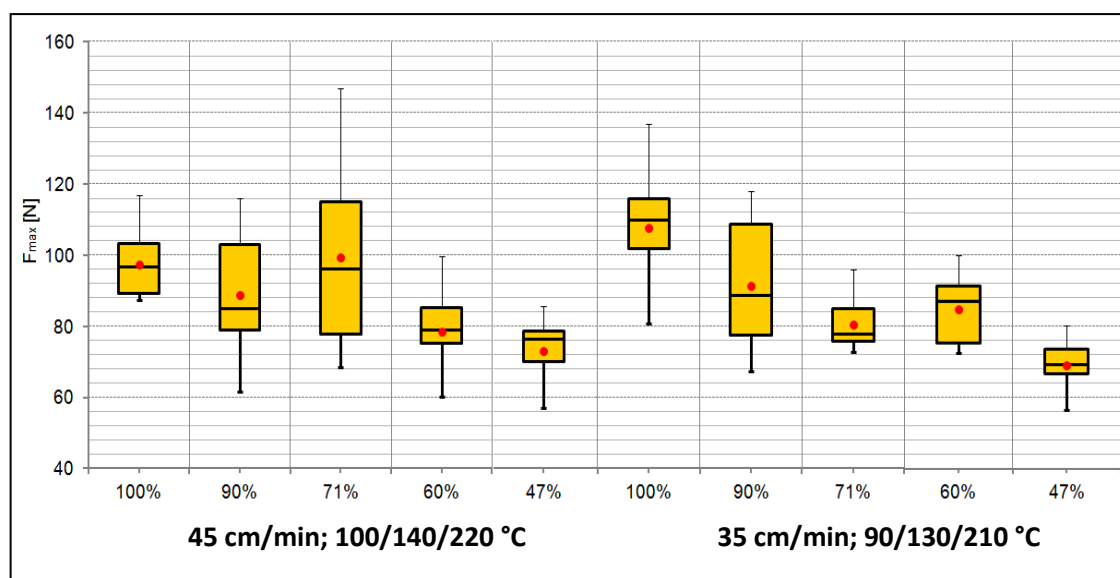
Z hodnot naměřených na trhacím stroji můžeme nyní vyhodnotit výsledky. Pro přehlednost byl použit sloupcový graf, v kterém můžete vidět naměřené hodnoty sil  $F_{\max}$ . V grafu jsou barevně rozlišeny dva druhy pájecích slitin. Žlutá označuje slitinu PF602-P30 a modře je označena slitina BSA04-XSP. Hodnoty na vodorovné ose jsou procentuální vyjádření objemu nanesené nízkoteplotní pájecí slitiny (Tab. 4). Čísla, které vidíte nad každým sloupcem, jsou průměrné hodnoty sil  $F_{\max}$  v newtonech. Poslední zanesené hodnoty v grafu jsou pájecí profily. Konkrétně tedy: rychlost posuvu a teploty jednotlivých zón.



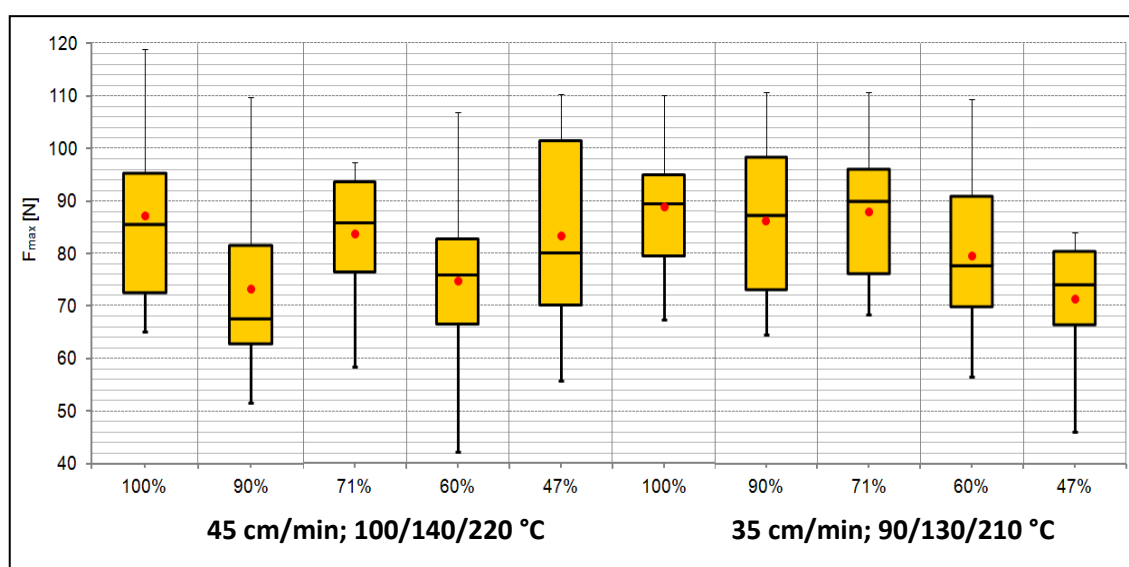
Obr. 19: Naměřené hodnoty na trhacím stroji vynesené v sloupcovém grafu

Všechny uvedené naměřené hodnoty z Obr. 19 byly dále zpracovány a vyneseny do boxových grafů níže (Obr. 20 a Obr. 21). Na těchto grafech můžete opět vidět na svislé

ose hodnoty  $F_{max}$ , v newtonech, které vyjadřují odtrhovou sílu potřebnou k odtržení součástky od DPS. Každý vzorek je tvořen deseti hodnotami  $F_{max}$  (deset vzorků na jedné DPS). Červené tečky v grafech značí průměrné hodnoty sil  $F_{max}$ , dále můžete vidět hladiny uvnitř obdélníků, ty značí mediány. Horní hladina každého obdélníku je rovna 75 % percentilu a spodní hladiny 25 % percentilu. Čáry, které vedou nahoru a dolu z každého sloupce, značí minimální a maximální hodnoty  $F_{max}$ , které byly naměřeny. Na vodorovné ose jsou uvedeny opět procentuální hodnoty objemu nízkoteplotní pájecí slitiny, která byly na vzorky naneseny.



Obr. 20: Naměřené hodnoty pájecí slitiny PF 602-P30



Obr. 21: Naměřené hodnoty pájecí slitiny BSA04-XSP

Z těchto dvou grafů můžeme vyčíst, že pokud použijeme menší množství nízkoteplotní pájecí slitiny, dojde ke snížení potřebné síly k odtržení součástky. Což vyšlo dle našeho očekávání. Dále můžeme vidět, že pokud nanese pouze 47% slitiny, potřebná odtrhová síla klesne, u slitiny PF 602-P30 dokonce klesla o více než 30 N. U slitiny BSA04-XSP klesla potřebná odtrhová síla méně, u prvního pájecího profilu nastal pokles o cca 4 N, u druhého pájecího profilu to bylo více, kolem 25 N. Ještě můžeme vidět, že pájecí slitina PF 602-P30 dosahovala vyšších odtrhových sil při nanesení 100 % pájecí slitiny než slitina BSA04-XSP. Rozptyl hodnot u slitiny PF 602-P30 je poměrně malý, kdežto u slitiny BSA04-XSP je výrazně větší.

Cílem této experimentální části bylo doporučit optimální množství nízkoteplotní pájecí slitiny pro testovaný typ spoje. Nejlepší je samozřejmě nanesení pájecí slitiny přes šablonu 120  $\mu\text{m}$  s 5 % redukcí, pokud ovšem potřebujeme snížit náklady a víme, že pájený spoj nebude nijak mechanicky namáhán, lze doporučit i menší množství pájecí slitiny. V tomto případě postačí objem slitiny, který se nanese tenčí šablonou, 80  $\mu\text{m}$ , při 20 % redukcí. Potřeba bude méně než polovina pájecí slitiny a spoj zhorší svou mechanickou pevnost o cca 30 %. Pokud, ale požadujeme vyšší nároky na pájené spoje a počítáme s vyšším mechanickým namáháním, ale zároveň chceme snížit náklady, optimálním řešením je pak nanesení pájecí slitiny přes šablonu 120  $\mu\text{m}$  s redukcí 10 %, popřípadě i s redukcí 20 % u slitiny PF 602-P30 a pájecího profilu: 45 cm/min; 100/140/220 °C a u slitiny BSA04-XSP u obou pájecích profilů, tedy 35 cm/min; 90/130/210 °C a 45 cm/min; 100/140/220 °C. Zároveň však nedojde k výraznému zhoršení mechanické pevnosti spoje. Dále lze spíše doporučit pájecí slitinu PF 602-P30 od společnosti SHENMAO Technology Inc., která dosahovala o něco vyšších hodnot  $F_{\text{max}}$  v případech, kdy se nanášelo 100 % a 90 % objemu pájecí slitiny v případech, kdy se nanášelo méně, jak 71 % objemu slitiny, jsou hodnoty téměř identické. Když se podíváme na pájecí profily, zjistíme, že jsou téměř identické a tudíž tolik nezáleží, který z těchto dvou profilů si vybereme. Plusem slitiny PF 602-P30 je, že má menší rozptyl výsledných hodnot oproti slitině BSA04-XSP.



## **Závěr**

Jedním z cílů této bakalářské práce bylo seznámit se s problematikou měkkého pájení a s měřením mechanické pevnosti spojů. Dále vypracovat přehled používaných zkoušek mechanických vlastností pájeného spoje. Dalším cílem bylo navrhnout a provést experiment měření mechanické pevnosti pájeného spoje v závislosti na množství nízkoteplotní pájecí slitiny. Na závěr bylo cílem provést vyhodnocení získaných dat experimentu a doporučit optimální množství nízkoteplotní pájecí slitiny pro testovaný typ spoje.

V teoretické části byl vysvětlen princip pájení a uvedeny pojmy jako pájecí slitiny, tavidla a také metody, kterými se pájí. Následně byly uvedeny ceny některých pájecích slitin a blíže byl vysvětlen pojem nízkoteplotní slitina. Dále byla probrána problematika životnosti pájeného spoje a faktory, které na pájený spoj působí. Velká část práce se věnovala vysvětlení a popsaní zkoušek mechanických vlastností pájeného spoje. Na závěr teoretické části byly uvedeny české normy, podle kterých se testuje mechanická pevnost pájeného spoje.

Experimentální část byla zaměřena na navrhnutí a provedení zkoušky, která ověřila mechanickou pevnost pájeného spoje. Bylo použito dvacet desek plošných spojů a každá byla navržena tak, že na ní mohlo být umístěno deset kusů součástek typu 1206. Na deset kusů DPS bylo naneseo za pomoci šablon různé množství pájecí slitiny PF 602-P30 od společnosti SHENMAO Technology Inc. A na zbylých deset DPS byla naneseo pájecí slitina Cobar BSA04-XSP od společnosti Balver Zinn Josef Jost GmbH & Co. KG. Následovalo osazení a připájení procesem přetavení v horkovzdušné peci Mistral 260. Byly použity dva rozdílné pájecí profily. Po vyrobení vzorků se mohlo přejít k měření mechanické pevnosti pájeného spoje. Měření bylo provedeno na trhacím stroji LabTech, byla použita mechanická zkouška smykem.

Experiment prokázal, že pokud se nanese různé množství nízkoteplotní pájecí slitiny, ovlivní to mechanickou pevnost pájených spojů. Příkladem může být, že pokud naneseo o více jak 50 % méně pájecí slitiny, výrazně poklesne mechanická pevnost spoje, rozdíl je zhruba 30 %. Pokud ovšem naneseo o 10 % méně slitiny, mechanická pevnost se sníží minimálně. Tudíž můžeme říci, že takovýto spoj dosahuje obdobné

pevnosti, jako když nanese 100 % objemu pájecí slitiny. Z výsledků naměřených hodnot lze doporučit slitinu PF 602-P30, která dosahovala vyšší mechanickou pevnost, v případě nanesení maximálního množství pájecí slitiny. Avšak při redukci objemu nanesené pasty, můžeme doporučit spíše slitinu BSA04-XSP, protože spolu s redukcí se nijak nesnižuje její mechanická pevnost. Kdežto u první slitiny je pokles mechanické pevnosti výraznější. Zrealizovaná praktická část nám prokázala, jak moc důležitý je objem nanesené nízkoteplotní pájecí slitiny a potvrdila jeho vliv na mechanickou pevnost pájeného spoje.

## Použitá literatura

- [1] *Pájení* [online]. [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvi%C4%8Den%C3%AAD13\\_prezetace.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvi%C4%8Den%C3%AAD13_prezetace.pdf)
- [2] ABEL, Martin a Vladimír CIMBUREK. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Pardubice: ABE.TEC, 2005. ISBN 80-903597-0-1.
- [3] HARANT, Jaroslav. *Mechanické vlastnosti pájeného spoje* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/15272/Bakalarska\\_prace\\_Jaroslav\\_Harant.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/15272/Bakalarska_prace_Jaroslav_Harant.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Václav Wirth.
- [4] ZÁLEŠÁK, Jakub. *Příprava a měření vybraných vlastností vrstev nanoprášku Ag na Cu substrátu* [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/211116/prif\\_b/Bakalarska\\_prace.txt](https://is.muni.cz/th/211116/prif_b/Bakalarska_prace.txt). Bakalářská práce. Masarykova Univerzita. Vedoucí práce Doc. RNDr. Jiří Sopoušek, CSc.
- [5] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektrotechnice*. 1. Vyd. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02-02392-3.
- [6] HARMAN, Dominik. *Testování aktivity tavidel pomocí testu roztékavosti* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/15294/BP\\_dominik\\_harman.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/15294/BP_dominik_harman.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Karel Rendl.
- [7] ČSN EN 29454-1. Tavidla pro měkké pájení. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [8] SZENDIUCH, Ivan. *Pájení a bezolovnaté pájky* [online]. [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [9] Stárnutí konstrukčních materiálů. *Průmyslové spektrum* [online]. MM, 2006 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/starnuti-konstrukcnich-materialu.html>
- [10] KLEIN WASSINK, R.J. *Soldering in Electronics*. Electrochemical Publications Limited, 1989.
- [11] 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.
- [12] LOMBERSKÝ, Filip. *Spolehlivost pájených spojů* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10482/BPSpolehlivost%20pajenych%20spoju-Lomersky%20Filip.pdf?sequence=1>. Bakalářská práce. FEL, ZČU. Vedoucí práce Ing. Václav Wirth.

- [13] PAŠKO, Martin. *Analýza změn v pájených spojkách vzniklých vlivem stárnutí* [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/3579/Diplomov%C3%A1%20pr%C3%A1ce.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Stejskal.
- [14] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-3292-6.
- [15] STARÝ, Jiří, Petr KAHLE a Josef ŠANDERA. *Plošné spoje a povrchová montáž*. Brno: PC-DIR Real, 1999. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1499-5.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] ČSN EN 60749 – 19. Polovodičové součástky – Mechanické a klimatické zkoušky – část 19: Zkouška pevnosti čipu stříhem. 2003.
- [19] LIPAŤSKÝ, Lubomír. *Porovnání vlastností pájených spojů na keramických substrátech pomocí zkoušky stříhem* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12486/bakal%C3%A1%20pr%C3%A1ce.pdf?sequence=1>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Adámek, Ph.D.
- [20] ČSN EN 62137 – 1 – 4. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 4: Zkouška cyklickým ohybem. 2009.
- [21] DUSEK, Milos a Christopher HUNT. Crack detection methods for lead- free solder joints. [online]. [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: [http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/matc164.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/matc164.pdf)
- [22] ČSN EN 62137 – 1 – 3. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 3: Zkouška cyklickým padáním. 2009.
- [23] 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.
- [24] *Ges Electronics* [online]. 2016 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/cz/sn95-5-ag3-8-cu0-7-461-20-250-GES07713794.html>
- [25] Zavedení nízkoteplotního procesu SMT. In: *DPS* [online]. 2013 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:3477/zavedeni-nizkoteplotniho-procesu-smt>
- [26] *Lead-Free Solder Paste PF602-P30* [online]. [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://www.nevo-solder.com/wp-content/uploads/PF602-P30TDS-V02-01.pdf>

- [27] *Product data sheet - BSA04-XSP* [online]. [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: [http://www.balverzinn.com/347.html?file=tl\\_files/balverzinn/downloads/datenblaetter\\_en/PDS\\_BSA04\\_Paste\\_GB.pdf](http://www.balverzinn.com/347.html?file=tl_files/balverzinn/downloads/datenblaetter_en/PDS_BSA04_Paste_GB.pdf)
- [28] HIRMAN, Martin a František STEINER. *A Comparison of the Shear Strength of Conductive Adhesives and Soldering Alloys*. Proceedings of the 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology. 2015.
- [29] HIRMAN, Martin a František STEINER. Influence of electrically conductive adhesive amount on shear strength of glued joints on flexible substrates. In *Abstracts proceedings : international flash conference IMAPS : Czech and Slovak chapter*. Brno: Brno University of Technology, 2015. s. 30-31. ISBN: 978-80-214-5270-1
- [30] Bezolovnatá pájecí pasta s nízkým bodem tání Sn42Bi58 500g. *HOTAIR.cz* [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://www.hotair.cz/detail/pasty-ciny-lepidla/cinove-pasty/bezolovnata-pajeci-pasta-s-nizkym-bodem-tani-sn42bi58-500g.html>
- [31] Pájení v elektrotechnice. *UMEL FEKT VUT v Brně* [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice/>
- [32] Pájení vlnou. *UMEL FEKT VUT v Brně* [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/virtualni-laborator/pajeni-vlnou/technologie/>
- [33] *Pájení* [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: [http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-t2-02\\_pajeni.pdf](http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-t2-02_pajeni.pdf)
- [34] *Minimum Tučan* [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://tuccy.sweb.cz/Minimum/Minimum%20Tucan.pdf>
- [35] STARÝ, Jiří a Petr KAHLE. *Plošné spoje a povrchová montáž*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011.
- [36] WANG, Jianhui, Long WEN, Jianwei ZHOU a Myungkee CHUNG. *Mechanical properties and joint reliability improvement of Sn-Bi alloy*. Electronics Packaging Technology Conference. 2011, roč. 2011, č. 13. ISBN: 978-1-4577-1981-3.
- [37] HARANT, Petr a František STEINER. *Testování pájitelnosti metodou smáčecích vah*. Electroscope. 2007, č. 1, s. 5. ISSN: 1821-4564.
- [38] STOKLASA, František. Pájecí slitiny. *COPTEL - Elektrotechnika* [online]. 2010 [cit.2015-11-28]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=6096>