

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Spolehlivost pájených spojů**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2012/2013

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

Jméno a příjmení: **Filip LOMBERSKÝ**  
Osobní číslo: **E10B0469P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Spolehlivost 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 pájených spojů a jejich spolehlivostí
2. Zpracujte přehled normalizovaných testů a zkoušek spolehlivosti pájených spojů
3. Porovnejte testy z hlediska jejich možného uplatnění ve výrobě elektronických zařízení

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. R. J. Klein Wassink Soldering in electronics
2. P. Mach, V. Skočil, J. Urbánek Montáž v elektronice
3. M. Abel, V. Cimburek Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Václav Wirth**

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis problematiky spolehlivosti pájených spojů, požadavky na jejich jakost a zejména na metody užívané k jejich kontrole. Jsou v ní popsány normalizované testy pájených spojů, které jsou následně porovnány z hlediska jejich užití ve výrobě elektronických zařízení.

## **Klíčová slova**

Pájený spoj, pájka, pájení, jakost, mechanické zkoušky, optické zkoušky, nedestruktivní zkoušky, ...

## **Abstract**

The present thesis is focused on a description of the reliability of solder joints, the requirements for their quality and in particular the methods used to control them. Thesis describes standardized tests of solder joints, which are then compared in terms of their use in the manufacture of electronic equipment.

## **Key words**

Solder joint, solder, soldering, quality, mechanical testing, optical testing, nondestructive testing, ...

## Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2013

Filip Lomberský

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Wirthovi za cenné rady ohledně zdrojové literatury, zejména doporučení potřebných technických norem, jenž pomohly k úspěšnému dokončení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>PÁJENÍ OBECNĚ</b> .....	<b>11</b>
1.1 PÁJKY – ROZDĚLENÍ, POUŽITÍ .....	11
1.1.1 Rozdělení pájek .....	11
1.1.2 Bezolovnaté pájky .....	11
1.2 TAVIDLA .....	12
1.3 PÁJENÍ (METODY) .....	13
1.3.1 Ruční pájení .....	13
1.3.2 Strojní pájení vlnou .....	14
1.3.3 Strojní pájení přetavením .....	15
<b>2 VADY A POŽADAVKY NA JAKOST PÁJENÝCH SPOJŮ</b> .....	<b>17</b>
2.1 JAKOST PÁJENÉHO SPOJE .....	19
2.2 ŽIVOTNOST PÁJENÉHO SPOJE .....	21
<b>3 ZKOUŠKY PÁJENÝCH SPOJŮ</b> .....	<b>22</b>
3.1 PŘEHLED NOREM PRO ZKOUŠKY PÁJENÝCH SPOJŮ .....	22
3.1.1 České normy .....	22
3.1.2 Mezinárodní normy .....	23
3.2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY .....	23
3.2.1 Zkouška stříhem .....	23
3.2.2 Zkouška tahem .....	25
3.2.3 Zkouška odolnosti proti odtržení .....	26
3.2.4 Zkouška cyklickým padáním .....	27
3.2.5 Zkouška cyklickým ohybem .....	28
3.3 OPTICKÉ (VIZUÁLNÍ) ZKOUŠKY .....	28
3.4 ZKOUŠKA ULTRAZVUKEM .....	29
3.5 RADIOGRAFICKÉ ZKOUŠENÍ .....	29
3.6 KAPILÁRNÍ ZKOUŠENÍ .....	30
3.7 ŠROVNÁNÍ METOD .....	31
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>33</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>34</b>



## Seznam symbolů a zkratk

DPS .....	Deska plošných spojů
Sn .....	Chemická značka cínu
Pb .....	Chemická značka olova
Ag.....	Chemická značka stříbra
Cu.....	Chemická značka mědi
Bi.....	Chemická značka bismutu
CCD .....	Charge-coupled device (elektronický snímač obrazu)

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na popis testovacích metod pro zjištění vad a jakosti pájených spojů.

Text je rozdělen do tří částí a závěru; první se zabývá obecným popisem procesu pájení (používané spojovací materiály - pájky, tavidla, metody pájení), druhá je zaměřena na shrnutí druhů vad v pájeném spoji a požadavků na jakost pájeného spoje. Třetí část popisuje různé metody užívané ke zkoušení vlastností pájených spojů. Jednotlivé zkoušky se poté porovnají z hlediska jejich užití při výrobě elektroniky.

Cílem práce je vytvořit souhrn metod užívaných ke kontrole a zjištění vad v měkkých pájených spojích, jenž se používají pro výrobu elektronických zařízení. V práci tedy budu klást důraz zejména na zkoušky pájených spojů na DPS.

Tyto zkoušky jsou důležité ze dvou hlavních hledisek, první a nejdůležitější je hledisko bezpečnosti neboť neodhalené vady v pájených spojích mohou vést nejen jejich selhání a tím i možné nefunkčnosti celého zařízení, ale i k dalším nebezpečným poruchám, jako jsou např. zkratky v daném obvodu. Druhé hledisko je ekonomické. Větší výskyt vad v pájených spojích vede k většímu počtu „zmetků“ čímž samozřejmě prodražuje celý výrobní proces. Vhodné užití nejrůznějších zkoušek od mechanických po optické, může napomoci k určení chyb ve výrobním procesu a tím i k jejich odstranění. To má posléze příznivý ekonomický dopad na celou výrobu.

## Pájení obecně

Pájení je proces spojování dvou materiálů (kovy) za pomoci roztaveného přídavného materiálu (pájky). Nejvíce se používá v elektrotechnice, kde zajišťuje pevné vodivé spojení součástí. Také se užívá pro spojování měděných potrubí, pozinkovaných plechů a letování konzerv nebo hudebních nástrojů atd. [2][6]

### 1.1 Pájky – rozdělení, použití

Pájka je kov nebo slitina kovů s nízkou teplotou tavení. Je určena k pevnému spojování materiálů z jiných kovů při pájení. [2]

#### 1.1.1 Rozdělení pájek

Dělí se na 2 základní skupiny podle teploty tavení:

- *Měkké pájky*

Tyto pájky mají teplotu tavení do 450 °C, obsahují nízkotavitelné kovy – obvykle cín nebo jeho slitiny s olovem, případně s příměsí kadmia nebo bismutu. Mají nižší mechanickou pevnost a teplotní odolnost [2]

- *Tvrdé pájky*

Jejich teplota tavení je nad 450 °C. Obvykle se používají slitiny mědi, hliníku a stříbra. Mají velkou mechanickou pevnost a tepelnou odolnost. [2]

#### 1.1.2 Bezolovnaté pájky

V elektrotechnice se až donedávna v měkkých pájených spojích nejvíce užívaly pájky na bázi Sn/Pb. To se ovšem změnilo s příchodem směrnice Evropské unie 2002/96/EC, která se zabývá používáním nebezpečných látek v elektronických a elektrických zařízeních. Ta je zavedena do české legislativy novelou zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech. Směrnice výrobcům ukládala za povinnost stáhnout do 1. července 2006 z evropského trhu všechny výrobky, v nichž se vyskytuje větší než povolené množství některé z nebezpečných látek daných touto směrnicí. Patří mezi ně těžké kovy jako rtuť, kadmium nebo právě olovo

používané v pájkách. Výjimkou jsou pouze případy, kdy nelze nahradit uvedené látky méně nebezpečnou látkou. [1]

Jaká jsou tedy kritéria pro bezolovnaté pájecí slitiny? Za prvé je to jejich netoxičnost. Následuje dostupnost a cenová přijatelnost, úzký teplotní rozsah plasticity, smáčivost, teplota zpracování a zejména schopnost vytvořit spolehlivý pájený spoj. [1]

S přihlédnutím k těmto kritériím je možné nalézt velké množství více či méně vhodných slitin. Uvedu tedy nyní příklady několika z nich: [1]

**Sn96.5/Ag3.5** – jde o jednu z nejslibnějších slitin pro bezolovnaté pájení, má teplotu tavení 221 °C

**Sn/Ag/Cu** – skupina slitin souhrnně označovaných jako SAC (poč. písmena chemických značek použitých prvků). Jejich teplota tavení se pohybuje kolem 217 °C v závislosti na poměru jednotlivých složek (rozdíly jsou ovšem minimální,  $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Mají podobnou nebo i lepší spolehlivost než slitiny Sn/Pb a lepší pájitelnost než slitiny Sn/Ag.

**Sn/Bi** – slitina cínu a bismutu, má výjimečnou odolnost proti zhrubnutí. Její teplota tavení je 138 °C, tudíž se hodí pro nízkoteplotní aplikace a některé spotřební výrobky.

## 1.2 Tavidla

Užívají se k podpoře smáčivosti pájky a k odstranění oxidů a jiných nečistot ze spojovaných povrchů. [1] Z toho vyplývají základní požadavky na vlastnosti tavidel. Jsou to: [2]

- Maximální podpora smáčení základního materiálu pájkou.
- Co největší schopnost rozpouštět oxidy na povrchu základního materiálu před začátkem pájení.
- Stálost fyzikálních a chemických vlastností během pájení. (viskozita, povrchové a mezifázové napětí, hustota, atd.)
- Minimální tvorba sloučenin ohrožujících zdraví, kovových par a plynů.
- Snadná odstranitelnost zbytků tavidla po pájení.

Ideálně je tavidlo po skončení pájení nečinné a není nutné ho odstraňovat, ovšem

reálně tomu tak není. Proto je nutné jej po procesu pájení odstranit. K tomu se užívají různé rozpouštěcí kapaliny. Z tohoto hlediska se tavidla dělí na: [1]

- Rozpustná rozpouštědlem
- Rozpustná ve vodě

Dále je možné tavidla také dělit podle způsobu jejich užití na tavidla pro měkké pájení a tavidla pro tvrdé pájení. [2]

### 1.3 Pájení (metody)

V této části se zaměřím především na metody používané ve výrobě elektroniky (desky DPS).

#### 1.3.1 Ruční pájení

Tento druh pájení se provádí pomocí tzv. pájedla. To je většinou opatřeno hrotem. Ten se zahřeje (obvykle elektricky) na teplotu potřebnou k roztavení pájky a přiloží ke spojovanému dílu (součástce). Ta se za pomoci tavidla zahřeje a po přiložení pájky dojde k jejímu roztavení a spojení obou dílů. [1] [2]

#### Vysokofrekvenční pájení

Jedná se o zvláštní druh ručního pájení využívající schopnost některých materiálů měnit se zvyšující se teplotou své magnetické vlastnosti. Využívá ztrát vznikajících ve feromagnetických látkách po vložení do střídavého magnetického pole. Konkrétně jde o ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Nejdůležitější pro tento druh pájení jsou ztráty hysterezní. Ty se projevují zahříváním daného feromagnetika. V důsledku dojde po určité době k zahřátí na tzv. Curierův bod, což je teplota, při níž feromagnetická látka ztrácí své magnetické vlastnosti a mění se na paramagnetikum. Tím dojde k poklesu ztrát a ochlazení materiálu pod Curierův bod, látka se opět stane feromagnetikem a celý proces se opakuje. [1] [3]

Prakticky je tato metoda realizována tak, že do pájecího hrotu je vložena cívka s feromagnetickým jádrem, jíž prochází vysokofrekvenční proud. Běžně používané kmitočty jsou 13,56 MHz a 470 kHz a výkon je 40 W respektive 35 W. Požadované pájecí teploty se dosahuje použitím vhodných slitin v pájce. [1]

### 1.3.2 Strojní pájení vlnou

Jedná se o historicky první metodu hromadného strojního pájení. Pro rozvoj této metody bylo důležité zavedení hromadné výroby plošných spojů. Tento typ pájení byl poprvé patentován v roce 1955 Angličanem Straussem a velice rychle se rozšířil, protože umožňoval zmenšení počtu potřebných pracovních sil a zvýšilo kvalitu a spolehlivost spojů. Dnes se užívá při výrobě většiny desek od jednovrstvých po vícevrstvé a k montáži jak klasických součástek tak i SMT, popřípadě obou najednou. [1] [2]

#### Jednotlivé operace při pájení vlnou

Vlastnímu procesu pájení předchází několik kroků, jako je předehřátí objektů a roztavení pájky, zároveň je třeba odstranit nežádoucí oxidy. Běžně se tedy proces pájení vlnou dělí do tří operací:

- *Aktivace pájených prvků*

nejdříve je třeba připravit všechny předměty k pájení tak, aby probíhalo co nejlépe. Zásadní problém je omezení vlivu oxidů, jenž vznikají na povrchu cínové lázně a jsou přítomny i na pájených prvcích. [1]

- *Předehřev desky plošných spojů*

deska se ohřeje na teplotu cca 100 °C, aby nedošlo k nežádoucímu teplotnímu šoku při kontaktu desky s roztavenou pájkou. Předehřev je také potřebný k aktivaci tavidla, které odstraní z pájených ploch nežádoucí oxidy.[1]

- *Vlastní pájení*

spojení dvou kovů roztavenou pájecí slitinou (pájkou). Deska je vlečena skrze roztavenou tekoucí pájku, přičemž jsou jednotlivé součástky pevně připájeny k desce plošných spojů.[1]

#### 1.3.2.1 Další metody pájení roztavenou slitinou

Existují i další metody strojního pájení pomocí roztavené slitiny, ovšem ty se používají spíše okrajově, proto je zmíním pouze stručně.

- ***Pájení ponorem***

Deska se při této metodě ponoří do roztavené slitiny. Tento postup se používá spíše jen na vzorkové série a není mnoho výrobců, kteří jej používají. [1]

- ***Pájení vlečením***

Deska plošných spojů je vlečena po klidné hladině roztavené pájky. Zařízení využívá vlnu s velmi pomalým tokem, dopravník posouvající desku je rovnoběžně s hladinou pájecí slitiny. [1]

### **1.3.3 Strojní pájení přetavením**

Jedná se o významný typ pájení. V principu jde o opačný postup než u předchozí metody pájení vlnou nebo u ručního pájení kontaktním nástrojem. V těchto případech se roztavený materiál přivádí na spojované místo, zatímco u pájení přetavením se pájecí materiál (pájecí pasta) nanese předem na pájené místo, na něj se umístí pájená součástka a následně se materiál přetaví působením tepelné energie. Vzhledem k ceně pájecích past se tato technologie užívá u náročnějších zařízení a výrobků. Velká část desek na vyšší technologické úrovni je dnes připravována právě tímto procesem. Nejdůležitějším parametrem k dosažení hladkého průběhu pájení v dostatečné kvalitě jsou vlastnosti pájecí pasty. [1]

#### ***Pájecí pasta***

Je to směs kovových (pájecí zrna) a organických (tavidlo) složek. Jejich poměr je obvykle 90% kovové složky a 10% organické složky. [1]

Vzhledem ke stále se zvyšující plošné hustotě součástek na DPS a stále většímu zjemňování rastrů musí pájecí pasty vykazovat rovnoměrné a velice jemné zrnění u kterého je malý rozptyl průměru zrn. Toho se dosahuje pomocí technologie rozprašování a odstředování v ochranném plynu.

Tavidlo v pájecí pastě se skládá ze čtyř složek: pryskyřice, aktivátoru, tixotropních materiálů a rozpouštědel. Vlastnosti má podobné jako tavidla užívaná při ručním pájení či pájení vlnou, tudíž se klade důraz zejména na schopnost odstraňovat z pájeného místa oxidy vznikající během procesu pájení. Ovšem v tomto případě se toho dosahuje pouze pomocí chemické dezoxidace. [1]

## Postupy užívané při pájení přetavením

### *Pájení v parách*

Metoda byla vytvořena v 70. letech 20. století firmou Bell Laboratoriem. Její princip je jednoduchý: Kapalina se ohřeje na bod varu a vypaří. Deska plošných spojů se ponoří právě do této odpařovací zóny. Pára na desce zkondenzuje, a protože se tento proces děje při teplotě vyšší než je bod tavení pájecí pasty, dojde k přenosu latentního tepla z páry na desku, čímž jí ohřeje na teplotu pájení. Dojde k vytvoření pevného pájeného spoje. K tomu to druhu pájení se užívají fluórouhlíky s bodem varu 215 nebo 250 °C v rozsahu 220 – 235 °C, popřípadě 250 – 265 °C. [4]

### *Přetavení infračerveným zářením*

Roztavení pájecí pasty se dosahuje tak, že se spojované díly nebo součástky vystaví vlivu tepelné energie, v tomto případě přenášené elektromagnetickým zářením, doté doby dokud nedojde ke zvýšení teploty pájecí pasty a jejího okolí nad bod tavení. [1] [4]

Běžně se k tomuto procesu v průmyslu používají tzv. přetavovací pece. Jde o zařízení, v němž se teplo emituje z elektricky ohříváných zářičů. To umožňuje částečnou regulaci teploty v peci změnou elektrického příkonu. Toto je zvláště důležité v „pásmových“ přetavovacích pecích. [1] [4]

Teoreticky lze užít k ohřevu pájených ploch jakékoliv záření z elektromagnetického spektra, ovšem z praktických důvodů se užívají vlnové délky od 0,1 μm do 100 μm. To pokrývá rozsah od ultrafialového světla přes světlo viditelné až po infračervené záření (IR). Tudíž přestože se používá termín „přetavení infračerveným zářičem“, případně „IR přetavení“, není jeho použití zcela správné. Mnohem přesnější by byl termín „Přetavení zářičem.“ Většinou se v tomto procesu užívají wolframové zářiče. [1] [4]

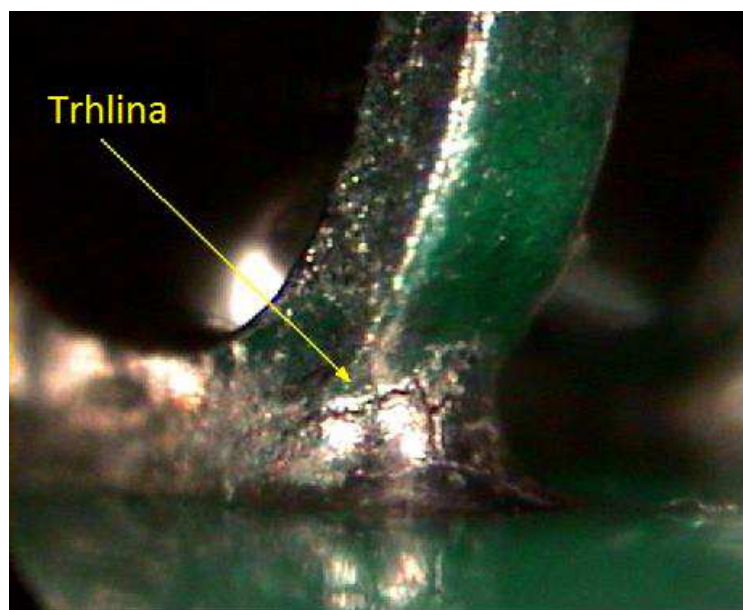


## 2 Vady a požadavky na jakost pájených spojů

Jedná se o nepravidelnosti v pájeném spoji, odchylky od předpokládané relativní polohy spojených součástí a od předpokládaného tvaru komponent, pokud jsou odchylky závislé na pájení. V případě tvrdého pájení jsou vady definovány v normě ČSN EN ISO18279. Vady se v případě tvrdého a měkkého pájení podobají až na jisté výjimky jako jsou pájecí můstky v případě pájení na DPS. [16]

Vady se je možno rozdělit do šesti skupin: [16] [23] [24]

Trhliny (povrchové trhliny, praskliny v materiálu) – vznikají v důsledku mechanického namáhání spoje. Příklad těchto vad je uveden na obr.1.1

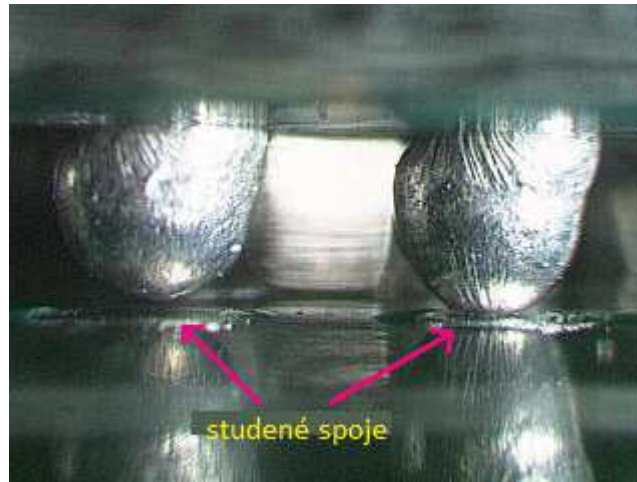


Obr. 1.1 Povrchová trhlina v pájeném spoji [24]

Dutiny (plynové kapsy, pórovitost, nedostatečné zaplnění spoje pájkou, atd.) – jsou důsledkem chyb v pájecím procesu.

pevné vměstky – jsou způsobeny nerovnoměrným rozlitím pájky nebo také nečistotami v pájce.

vady spojení ( pájkové můstky – působí zkraty, studené spoje – zhoršují elektrickou vodivost spoje) – způsobené chybným procesem pájení. Na obr.1.2 je příklad studeného spoje.



Obr. 1.2 Studený spoj [24]

vady tvaru a rozměru (hrubý povrch, krátery na povrchu spoje, nedostatečný meniskus způsobený nedostatečným množstvím pájky, atd.)

ostatní vady (rozstřík pájky v okolí spoje, kuličky na povrchu spoje a jeho okolí, pájecí plochy bez pájky)

Dále se vady dělí na vnější a vnitřní:

**vnější vady** – mezi tyto poruchy v pájeném spoji se řadí místa na povrchu spoje nedokonale zaplněné pájkou, povrchové trhliny, pórovitost, přesahy pájky, hrubý povrch, lokální natavení [16]

**vnitřní vady** – spadají sem, vnitřní trhliny, vady zaplnění pájkou, pevné vměstky, plynové kapsy, nedostatečné roztavení [16]

V praxi se ukazuje, že cca 80 – 95% závad v plošných spojích je způsobeno chybami v technologickém postupu výroby (sem spadá většina vad v pájeném spoji). Zbytek jsou chyby součástek, mechanických prvků, atd. [1] Těchto se již ovšem tato práce netýká.

Z výše uvedeného vyplývá, že i malé vady mohou způsobit buďto selhání samotného spoje (například v důsledku jejich polohy ve spoji – způsobí menší odolnost spoje proti působení vnějších sil) nebo zhoršení elektrických vlastností spoje v případě desek plošných spojů (např. vnitřní dutiny mohou způsobit zvýšení elektrického odporu spoje). Je tedy důležité mít důkladné a přesné kontrolní mechanismy, které takové vady odhalí.

## 2.1 Jakost pájeného spoje

V dnešní době se jakost upřednostňuje před spolehlivostí. Jakost (nebo také kvalita) se pro různé druhy výroby liší (hračky, spotřební elektronika, vojenství, lékařství atd.) a při vyšší kvalitě roste důvěra zákazníků k výrobku, tím i poptávka a tak je možné zvýšit jeho cenu .

Jakost pájených spojů se posuzuje z různých hledisek. Tvar pájeného spoje je posuzován z optického a z funkčního hlediska, kde je rozhodující spolehlivost a životnost pájeného spoje. [10]

Výsledná jakost je ovlivněna řadou faktorů, z nichž mezi ty nejzákladnější patří: [10]

- stárnutí materiálu,
- mechanické namáhání,
- teplotní namáhání.

### Stárnutí materiálu

Na stárnutí materiálu má vliv okolní prostředí a chemické změny probíhající ve spoji. Zásadní vliv má tvorba difúzní vrstvy, která je sice na jedné straně potvrzením vytvoření pájeného spoje, ale na druhé straně zhoršuje vlastnosti spoje, buďto zvyšováním odporu spoje, nebo jeho mechanickým narušením. Vrstva je tvořena intermetalickými slitinami mědi a cínu ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ,  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , atd.), které s časem narůstají, přesněji zvyšují svou tloušťku a jejich růst je navíc urychlován působením zvýšených teplot. [10]

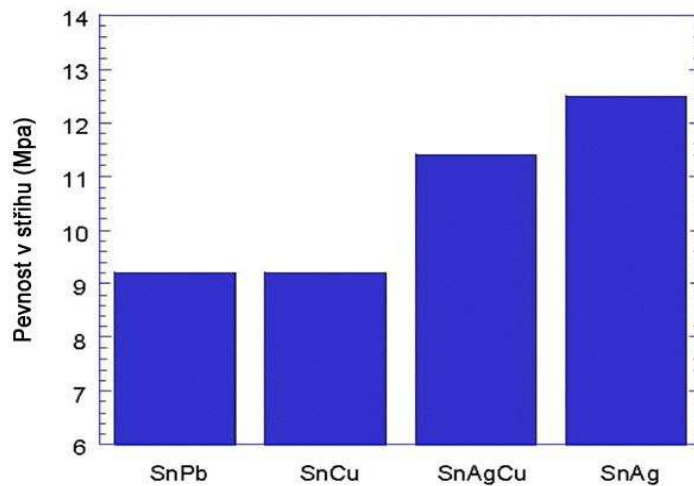
Tloušťka difúzní vrstvy je řádově v jednotkách mikrometrů, s rostoucím časem a zvýšeným tepelným namáháním může ovšem narůst až na desítky mikrometrů. Pájený spoj potom ztrácí své mechanické a elektrické vlastnosti, což může vést k jeho selhání. [10]

## Mechanické namáhání

Rozlišujeme ho na dva typy: [10]

- externí (působením vnějších sil, např. vibrace, tlak),
- interní (rozdílná teplotní délková roztažnost spojovaných materiálů, součástka - spoj - substrát).

Na obrazu 1.3 je příklad srovnání pevnosti ve stříhu pro různé slitiny pájek.



Obr. 1.3: Porovnání pevnosti v stříhu dle [22].

Pnutí vyvolané rozdílnou teplotní délkovou roztažností způsobuje únavu materiálu, což se projevuje zhoršením mechanických a elektrických vlastností a následným vznikem prasklin, trhlin apod. [10]

## Tepelné namáhání

Je způsobeno účinkem tepla na pájený spoj. Jsou dvě možné příčiny tohoto namáhání. Buď je způsobeno vnějším zdrojem tepla (umístěním obvodu v blízkosti zařízení vyzařujícího tepelné záření např. v automobilech nebo topných spotřebičích), nebo vzniká uvnitř obvodu důsledkem ztrátového výkonu (ztrátový výkon na danou plochu roste vlivem stále větší integrace). Vznikají buďto jevy nevratné (změny struktury, difúze apod. způsobí stárnutí materiálu), nebo vratné (mechanické změny rozměrů, průhyby materiálu apod.). [10]

## 2.2 Životnost pájeného spoje

Životnost výrobku se normálně určuje časem, za který se výrobek opotřebuje natolik, že už nemůže plnit svoji funkci. Protože tato doba se u většiny výrobků pohybuje v řádech let, již dříve se u klasických součástek zjišťovala životnost pomocí tzv. zrychlených zkoušek. To jsou v podstatě simulace pracovního režimu výrobku za zvýšené, resp. snížené teploty, popřípadě při zvýšené relativní vlhkosti, vibracích a podobně. Tyto faktory urychlují stárnutí a dochází tak k simulaci vnitřních jevů v pájených spojích a součástkách, kdy je urychlena jejich degradace. Jedná se především o elektrochemický proces koroze a fyzikální procesy difúze. [1]

Difúze materiálů se projevuje vznikem intermetalických slitin a jejich růstem. Ty vykazují zhoršené elektrické vlastnosti, především vodivost, což má za následek degradaci a postupem času až nefunkčnost pájeného spoje. Elektrochemická koroze mění materiálové vlastnosti spoje a nakonec vede k jeho destrukci. [1]

Odhad životnosti pájeného spoje je tedy ovlivňován mnoha faktory a z tohoto důvodu není vždy jednoduché provést. Mezi základní 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. [1]

## 3 Zkoušky pájených spojů

### 3.1 Přehled norem pro zkoušky pájených spojů

Nejprve uvedu seznam jednotlivých norem, jak českých tak několik příkladů zahraničních norem, určených pro zkoušky pájených spojů. Mnoho českých norem je ve skutečnosti přejatých z norem mezinárodních.

#### 3.1.1 České normy

- **ČSN EN 62137 – 1 – 1. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 1: Zkouška odolnosti proti odtržení** – Norma specifikuje pro oblast povrchové montáže zkoušku pevnosti pájeného spoje ve stříhu
- **ČSN EN 62137 – 1 – 2. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 2: Zkouška pevnosti ve smyku** – Pro povrchovou montáž specifikuje průběh zkoušky odolnosti proti odtržení
- **ČSN EN 62137 – 1 – 3. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 3: Zkouška cyklickým padáním** – Určuje zkoušku cyklickým padáním pro povrchově montované pájené spoje
- **ČSN EN 62137 – 1 – 4 Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 4: Zkouška cyklickým ohybem** – Určuje zkoušku cyklickým ohybem pro povrchově montované pájené spoje.
- **ČSN EN 12797. Tvrdé pájení – Destruktivní zkoušky pájených spojů** – Zavádí destruktivní (mechanické) zkoušky stříhem, tahem, krutem, atd. pro spoje vytvořené technologií tvrdého pájení.
- **ČSN EN 12799. Tvrdé pájení – Nedestruktivní zkoušení pájených spojů** – Obsahuje optické, radiografické, ultrazvukové, kapilární a další nedestruktivní zkoušky užívané pro tvrdě pájené spoje

### 3.1.2 Mezinárodní normy

- **MIL-STD-883H - TEST METHOD STANDARD FOR MICROCIRCUITS** – Vojenské normy pro zkoušky elektronických obvodů (včetně pájených spojů)
- **9703: IPC/JEDEC Mechanical Shock Test Guidelines for Solder Joint Reliability** – mezinárodní norma pro mechanický nárazový test povrchově montovaných spojů
- **J-STD-001E: Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies** – Obsahuje všeobecné požadavky pro pájené elektronické sestavy, včetně požadavků na jakost spojů a její ověřování (zkoušky)
- **IEC 62137 – 1 – 5. Surface mounting technology - Environmental and endurance test methods for surface mount solder joints - Part 1-5: Mechanical shear fatigue test** – Definuje únavovou zkoušku stříhem pro povrchově montované spoje

## 3.2 Mechanické zkoušky

Tepelné změny a mechanické vibrace ovlivňují životnost pájeného spoje a mohou způsobit jeho selhání (kritické např. u flip-chip – malé vývody a tím i pájené spoje). Tyto změny jsou obvykle cyklické, čímž za provozu dochází k únavě materiálu. Proto je důležité analyzovat mechanické vlastnosti pájených spojů. [7]

Mechanické zkoušky se používají pro zjištění deformace pájky v závislosti na době působení vnějších zatěžovacích sil. Pro tuto práci jsem vybral zejména zkoušky užívané ve výrobě elektroniky a DPS. 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 součástí! [8]

### 3.2.1 Zkouška stříhem

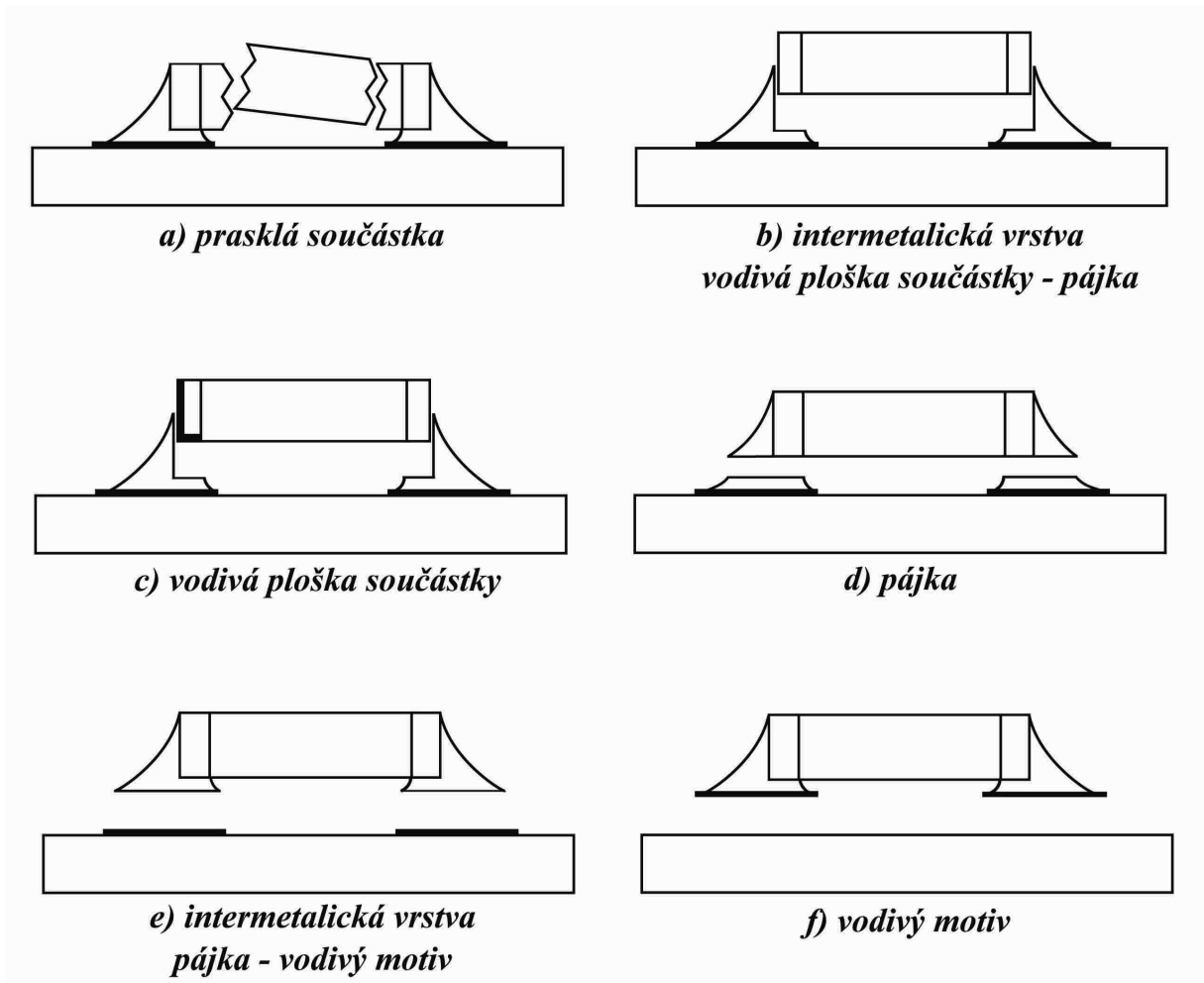
Tato metoda je pro výrobu elektroniky (převážně spoje tvořené měkkými pájkami) popsána normou ČSN EN 60749 – 19 jako zkouška pevnosti čipu stříhem nebo normou ČSN EN 62137 – 1 – 2 jako zkouška pevnosti ve smyku. Pro tvrdé pájení je popsána v normě ČSN EN 12797, kde jsou popsány i ostatní destruktivní mechanické zkoušky pro tvrdě pájené spoje

(tedy zkoušky tahem, ohybem, odolností vůči odtržení, atd.). Je to zavedená metoda pro hodnocení nejen míry šíření trhlin a poškození pájených spojů, ale také celkové síly spoje. Princip je založen na předpokladu, že přítomnost trhlin v pájeném spoji, jejich velikost a rozsah šíření, bude mít vliv na pevnost spoje. Z tohoto může být stanovena souvislost mezi pevností pájeného spoje a jeho selháním. Při této zkoušce se tedy zkoumá síla, která je potřebná k utrhnutí součástky v pájeném spoji. Tato síla je odlišná pro různé typy pájek. [8] [11] [12]

Zkouška se běžně provádí při pokojové teplotě, ale může se provádět i při zvýšených teplotách nebo po teplotním cyklování. Při použití teplotního cyklování je normou ČSN EN 62137 – 1 – 2 doporučeno cyklování od -40 do +125 °C, přičemž změna teploty od spodní hranice po horní trvá 30 min. Deska se po skončení teplotního cyklování může testovat až po více jak 4 hodinách. Do té doby je umístěna ve standardních atmosférických podmínkách. Při nastavování stříhové hlavy musí být hlava rovnoběžně s testovanou součástkou. Nesprávné nastavení způsobuje předčasné popraskání pájeného spoje, což vede k nepřesným výsledkům.[9] [12]

Dalším parametrem, který se nastavuje, je výška hlavy. Dle normy musí stříhová hlava tlačít minimálně do  $\frac{3}{4}$  výšky testované součástky. Je důležité, aby stříhová hlava tlačila na co největší boční plochu součástky, ale zároveň se nedotýkala desky. Před zkouškou se také nastavuje rychlost posuvu hlavy. Doporučená hodnota je od 0,5 do 9 mm/min. Samozřejmostí je také správné upevnění desky, aby nedocházelo k jejímu pohybu v průběhu testu, což by zkreslovalo výsledky. Po nastavení stříhové hlavy před součástku se spustí test. Působící síla se zvyšuje, dokud nedojde k utržení součástky a následně zaznamená. [8] [12]





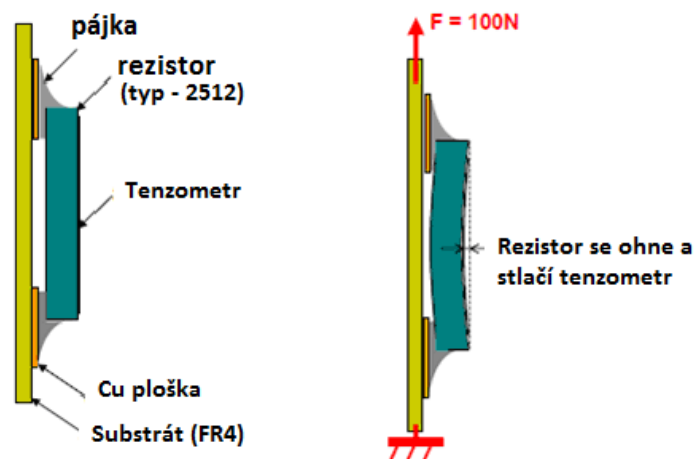
Obr. 1.4: Místa utržení při testu stříhem [12].

### 3.2.2 Zkouška tahem

Při zkoušce tahem působí na testovací vzorek síla, jejímž působením se spoj deformuje (v tomto případě prodlužuje, natahuje) a síla má určitý nárůst v čase (řádově v jednotkách N/s). Příklad zkušebního vzorku je na obr. 1.5. Deformace se měří tenzometry, které jsou umístěny na horní straně připájené součástky (obr.1.6). Tato metoda se ovšem v současnosti nedoporučuje k užití v praxi kvůli komplikacím spojeným s upevněním tenzometru ke zkušebnímu vzorku. [8]



Obr. 1.5 Zkušební vzorek [8]

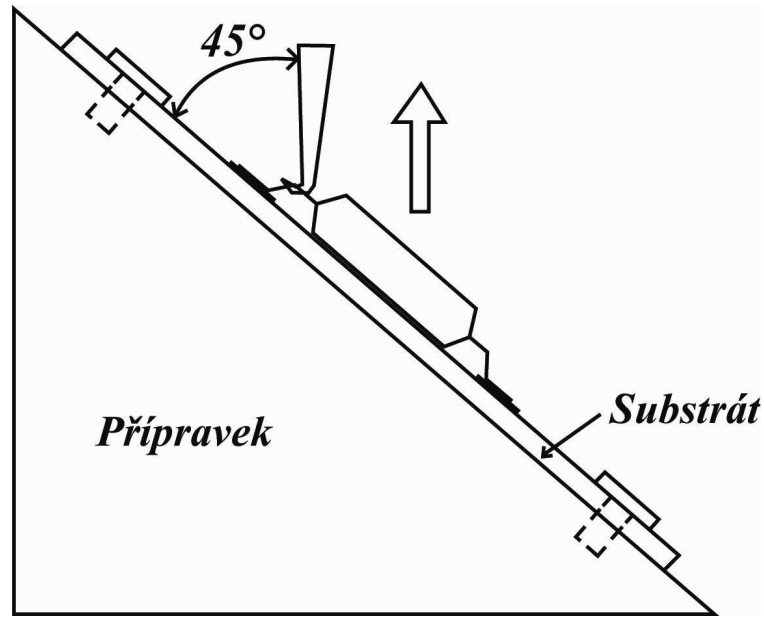


Obr. 1.6: Průběh zkoušky tahem [8]

### 3.2.3 Zkouška odolnosti proti odtržení

Tato zkouška je uvedena v normě ČSN EN 62137 – 1 – 1. Slouží pro zjištění a hodnocení pevnosti se součástkou pod úhlem 45 °. Při použití teplotního cyklování je v normě doporučeno cyklování od -40 do +125 °C, kdy změna teploty od spodní hranice po horní trvá 30 min. Tato metoda je destruktivní a může dojít k zjištění následujících poruch: [13]

- utržení nožičky od součástky,
- utržení mezi intermetalickou vrstvou,
- utržení celého pájeného spoje od kontaktní plošky,



Obr. 1.7: Zkouška odolnosti proti odtržení [13]

### 3.2.4 Zkouška cyklickým padáním

Je popsána v normě ČSN EN 62137 – 1 – 3. Při této zkoušce se testovaný vzorek (DPS) umístí do mechanismu, který opakovaně simuluje pád z dané výšky. Používají se výšky 1,5 a 0,75 m. Na povrch testované desky se umístí tenzometr, jenž měří tlak na povrchu. Dále se deska připojí k zařízení, sledující jestli nedošlo k elektrickému přerušení. Zařízení by mělo být schopné zaznamenat přerušení do 100  $\mu$ s. Okamžité přerušení je bráno jako porucha. [14]  
Příklady přerušení: [14]

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

### 3.2.5 Zkouška cyklickým ohybem

Je dána normou ČSN EN 62137 – 1 – 4. Slouží pro zjištění a hodnocení mechanické pevnosti pájených spojů při dlouhodobém zatížení. Dále se může použít např.: pro sledování mechanického namáhání tlačítek mobilních telefonů.

Deska se umístí do přípravku, jenž se skládá ze dvou pohyblivých upínacích hrotů a jednoho hrotu, který tlačí na střed desky a způsobuje tak její ohyb. Poté se připojí vodiče pro sledování elektrického odporu a pro sledování okamžitého elektrického přerušení. Rychlost prohýbání se nastavuje na 0,5 mm/s. Maximální průhyb se stanoví provedením předběžné zkoušky. Běžně se ovšem volí přibližně 1 až 4 mm. Množství zatěžovacích cyklů v průběhu testu je několik tisíc. Zařízení měřící elektrické přerušení je schopné zaznamenat přerušení v délce přibližně 10 až 100  $\mu$ s. Záznamové zařízení zaznamenává počet cyklů, posuv a sílu. [15]

### 3.3 Optické (vizuální) zkoušky

Tento druh testů se řadí dle normy ČSN EN 12799 mezi nedestruktivní metody testování pájených spojů. Je možné je užít jak pro elektroniku (desky plošných spojů) tak i pro další aplikace využívající pájené spoje (tvrdé pájení). Dělí se na tři základní postupy:

- **Lidský zrak (vizuální prohlídka)**

Je to nejjednodušší a nejlevnější metoda optických zkoušek. Nejdůležitějším kritériem je zde kvalita zraku operátora provádějícího zkoušku a jeho zkušenost. Kvalita zraku pracovníka má být ověřena podle článku 6.3 EN 473 1993. Pracovník také musí být dostatečně obeznámen s užitým postupem pájení (technologíí výroby) a musí znát možné vady vyskytující se v takto zapájeném spoji. [1] [17]

- **Dílenská lupa (mikroskop)**

Podobná metoda jako výše uvedená. Požadavky na kvalifikaci zkoušejících pracovníků jsou prakticky totožné. Výhoda této metody ovšem spočívá ve využití zrakových pomůcek (lupa, mikroskop), díky čemuž je možná kontrola DPS s vyšší hustotou součástek. [1] [17]

- **AOI - Automatická optická inspekce**

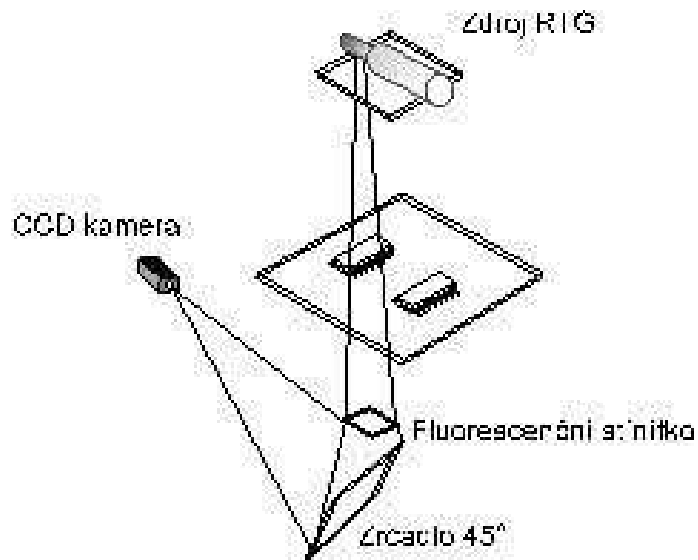
Zkoušku provádí automatické zařízení, jenž podle nastavených požadavků zjistí závadu. V posledních letech se systémy Automatické Optické Inspekce (AOI) stále více uplatňují při řízení kvality v osazovacích linkách DPS. Jedním z hlavních důvodů je zvýšení hustoty součástek na DPS, jenž ztěžuje nebo úplně vylučuje kontrolu zrakem, popřípadě mikroskopem. [1] [5]

### 3.4 Zkouška ultrazvukem

Je popsána v normě ČSN EN 12799. Je založena na principu akustického vlnění, jehož kmitočet je nad 20 kHz (tzv. ultrazvuk). Nejvíce se užívá metoda odrazová. Její princip spočívá ve vyslání krátkého ultrazvukového impulsu do zkušební vzorku. V něm se odráží od protilehlého rozhraní pájka-základní materiál nebo od možné vady a přijímá se opět na straně, odkud byl vyslán. Je-li v materiálu vada (trhlina, dutina apod.), odrazí se od ní část ultrazvukových vln. Ty dospějí do přijímače dříve. Analýzou vlastností přijatých vln je pak možné zjistit druh a tvar vady. Tato zkouška se užívá v oblasti tvrdého pájení.[6] [17]

### 3.5 Radiografické zkoušení

Jedná se o metodu podobnou zkoušce ultrazvukem. V oblasti povrchové montáže je nazývána rentgenová kontrola, podle použitého druhu záření (viz. dále). Je založena na principu vyslání ionizujícího záření (EM vlny) do zkoušeného vzorku. Běžně se, jak jsem již uvedl, užívá rentgenové nebo gama záření. Rentgenové paprsky se šíří zkoušeným vzorkem. Absorpce rentgenových paprsků je úměrná k jejich interakci s orbitálními elektrony v materiálu. Záření prochází kontrolovaným předmětem, paprsky dopadají na fluorescenční stínítko, kde se dostávají do viditelného spektra. CCD kamera přes zrcadlo snímá již viditelný obraz. Z průběhu a velikosti změn při průchodu záření hmotou lze určit možný výskyt makroskopických defektů (trhlin, dutin) a dalších vad. Na obr. 1.8 je náčrt zkušebního zařízení i se zkoušeným vzorkem. [20] [17] [25]



Obr. 1.8 Zkušební zařízení a testovaný vzorek při rentgenové kontrole [25]

Dříve se k zachycení ionizujícího záření a následnému vyhodnocení užíval film s fotografickou emulzí. Dnes již tento postup zastarává a stále více se uplatňují systémy digitální radiografie (DR) a počítačové radiografie (CR) užívající nefilmové detektory záření, které jsou citlivější a umožňují lepší analýzu získaného obrazu. [19] [17]

### 3.6 Kapilární zkoušení

Tato metoda slouží k detekci povrchových a podpovrchových vad ve spoji, jako jsou pórovitost, neúplné zatečení pájky, nedostatečná smáčivost. Metoda funguje na principu kapilární elevace, tedy na povrchovém napětí kapaliny způsobeném kohezní silou u stěn nádoby. [21] [17]

Trhlina v testovaném spoji se při použití vhodné detekční kapaliny, tzv. penetrantu, chová jako kapilára. Pokud má penetrant dobrou smáčivost a nízké povrchové napětí, pronikne, po nanesení na povrch pájeného spoje, do trhliny. Penetrant, který vnikl a zůstal v povrchových trhlínách, sacím účinkem vývojky zpětně vzlíná k povrchu a prostřednictvím barviva, který penetrant obsahuje, se poté určují detekované vady. [21] [17]

Metodu je možné rozdělit podle penetrantů na: [21]

- Metodu s barevnou indikací (v penetrantu je červené nebo modré barvivo)
- Metodu fluorescenční

Detekce vady je nejčastěji vizuální, tj. lidským okem, při fluorescenční metodě lze ovšem použít i CCD kameru. Rozlišovací schopnost lidského oka je ze vzdálenosti 30 cm přibližně 0,09mm. [21]

Výhodou této metody je její schopnost odhalit i velmi malé trhliny, aplikovatelnost přímo ve výrobním procesu (kapilární linky pro hromadnou kontrolu zkoušených dílů) a jednoduchá obsluha. [21]

Nevýhodou metody je detekce pouze povrchových vad na nenasáklivém materiálu, možnost chybné detekce při znečištěném povrchu a nutný přístup k testovanému objektu. [21]

### 3.7 Srovnání metod

Z hlediska rozdělení zkoušek na destruktivní a nedestruktivní je možné říci, že většina mechanických zkoušek (tedy destruktivních) má uplatnění jak ve výrobě elektroniky tak i v ostatních odvětvích pájení (tvrdé pájení – strojírenství, v elektrotechnice spoje ve vinutí transformátorů a motorů). Z nedestruktivních metod mají ve výrobě elektroniky uplatnění zejména metody optické (lidský zrak, mikroskop, AOI).

Zaměřením se na konkrétní metody, lze ještě přesněji určit oblast jejich použití. Metoda zkoušky stříhem je vhodná pro měkké spoje i pro tvrdě pájené spoje. V případě měkkých spojů, jenž se užívají zejména ve výrobě DPS, je použitelná pro součástky a konektory pro povrchovou montáž, ovšem nehodí se pro více vývodové součástky a pro vývody typu gull wing (racčího křídla). Také není vhodná pro velikosti pájených plošek větších než 10 mm<sup>2</sup>, pro flip-chip technologii a pro flexibilní substráty. Tuto metodu ovšem nelze použít na všechny výrobky, vzhledem k tomu že je destruktivní. Je nutné vybrat náhodně několik vzorků reprezentujících celou výrobní sérii. Z toho vyplývá, že nedojde k odhalení všech vadných výrobků. Metoda tudíž není vhodná k vyhledávání konkrétních vadných produktů, ale spíše k určení přesnosti a spolehlivosti celého pájecího procesu.

Jak již napovídá název je zkouška odolnosti proti odtržení vhodná pouze pro elektroniku a desky plošných spojů neboť cílem této zkoušky je zjistit sílu potřebnou k odtržení součástky ze spoje nebo přímo celého pájeného spoje z povrchu DPS. Používá se pro součástky pro povrchovou montáž s vývody typu gull wing. Jako v předchozím případě není možné tuto metodu použít na celou výrobní sérii, ale pouze na vybrané vzorky.

Zkouška tahem, jak jsem již výše uvedl, se kvůli problémům s upevněním tenzometru v elektronice nepoužívá. Má uplatnění spíše v tvrdě pájených spojích, např. ve strojírenství.

Zkouška cyklickým padáním je vhodná pro složitější sestavy, u nichž může docházet k opakovanému pádu z výšky a tím i k jejich poškození (např. mobilní zařízení). Testuje především spoje u součástek s více vývody, kde je větší pravděpodobnost poškození pájeného spoje na některém z vývodů a tím i narušení funkce celé sestavy. Zkoušku cyklickým ohybem je možné užít jak u měkkých pájených spojů, tak i u tvrdých pájených spojů a nachází tak uplatnění v širokém rozmezí kontroly kvality výrobních procesů. Obě tyto zkoušky slouží ke zjištění spolehlivosti zařízení při jeho opakovaném mechanickém namáhání. Díky tomu je možné nejen ověřit spolehlivost jednotlivých pájených spojů, ale i spolehlivost návrhu daného zařízení jako celku.

Optické zkoušky se hodí jak pro spoje v technologii povrchové montáže, tak i pro tvrdě pájené sestavy. Díky pokrokům v technologii AOI se jejich význam neustále zvyšuje a je možné těmito testy odhalit široké spektrum povrchových vad. Bohužel není možné jejich pomocí zjistit skryté vady uvnitř spoje. Díky tomu, že nejsou destruktivní, je možné kontrolovat kvalitu spojů u celé výrobní série a díky tomu omezit množství vadných výrobků jdoucích do prodeje nebo provozu.

Ultrazvuková a radiografická zkouška má uplatnění hlavně u tvrdě pájených sestav. Výhodou těchto zkoušek je, že jsou schopné odhalit velké množství vnitřních vad spoje bez jeho zničení. Ultrazvuková zkouška se ke kontrole povrchově montovaných spojů neužívá, zatímco radiografická (rentgenová) zkouška se v omezené míře užívá pro testování pájených spojů na DPS. Zkušební zařízení je ovšem u této zkoušky velmi drahé. Kapilární zkouška se pro použití na DPS příliš nehodí, vzhledem k obtížnějšímu přístupu k jednotlivým spojům, zvláště u součástek s více vývody.



## Závěr

Cílem této bakalářské bylo shrnutí, popsání a srovnání různých zkušebních metod a testů používaných pro určování jakosti pájených spojů. V první části této práce jsem tedy stručně popsal používané typy pájek, tavidel a druhy pájecích metod. Zvláštní pozornost jsem věnoval bezolovnatým pájkám, neboť rozsah jejich užití se díky legislativním změnám v posledním desetiletí značně zvýšil. Další část jsem věnoval popisu a rozdělení vad v pájeném spoji a popisu faktorů ovlivňujících jakost a životnost spoje. Třetí část je již věnována samotnému popisu zkušebních metod od destruktivních mechanických zkoušek po nedestruktivní zkoušky radiografické a kapilární. Také zde srovnávám jednotlivé metody z hlediska jejich uplatnění ve výrobě elektronických zařízení.

Z tohoto srovnání vyplývá, že naprostá většina mechanických (destruktivních) zkoušek je uplatnitelná v kontrole jakosti povrchově montovaných pájených spojů, každá samozřejmě pro jiný druh součástek. Z nedestruktivních zkoušek nachází při výrobě DPS uplatnění hlavně zkouška optická, zejména technologie AOI. Radiografická (v tomto případě spíše rentgenová) zkouška je pro tuto oblast také použitelná, ovšem spíše v omezené míře vzhledem k vysokým nákladům na zkušební zařízení.

Závěrem lze říci, že kontrola jakosti a zkoušky pájených spojů jsou velice důležitou součástí výrobního procesu, bez které se dnes již žádná společnost, specializující se na toto odvětví, neobejde.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Abel, Martin: Bezolovnaté pájení v legislativě a praxi, ABETEC 2005, ISBN 80-903597-0-1.
- [2] Pájení, Viliam Ruža ; Ze slov. přel. Jindřich Klůna. -- 2., upravené a dopln. vyd. --Praha : SNTL ; 1988. -- 452 s.
- [3] Plošné spoje se SMD, návrh a konstrukce / Martin Abel. -- Vyd. 1. -- Pardubice : Platan, 2000. -- 218 s. : il. ; 23 cm. -- ISBN 80-902733-2-7 (brož.)
- [4] ZÁHLAVA, V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů. BEN – technická literatura, Praha, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4.
- [5] VI Technology: optická inspekce. [online]. [cit. 2013-04-03]. Dostupné z: <http://www.amtest.cz/dodavatel/vi-technology/#Opticka%20inspekce>
- [6] DRIML, Bohuslav. 4.ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ. In: [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: [http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky\\_mat.pdf](http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf)
- [7] SOPER, A.; POZZA, G.; IGNAT, M. aj. Mechanical response of solder joints in flipchip type structures [online]. Vydáno: 9.3.1998, [cit. 2013-04-15]dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271497001595>
- [8] DUSEK, Miloš.; HUNT, Christopher. Crack detection methods for lead – free solder joints [online]. 3/2004, [cit. 2013-04-15] dostupné z: [http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/matc164.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/matc164.pdf)
- [9] ENTEGGART, Ian. The role of micromechanical testing in microelectronics [online]. [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.instron.com/wa/library/StreamFile.aspx?doc=47>
- [10] SZENDIUCH, Ivan. Pájení a bezolovnaté pájky [online]. [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [11] ČSN EN 60749 – 19. Polovodičové součástky – Mechanické a klimatické zkoušky – část 19: Zkouška pevnosti čipu stříhem. 2003.
- [12] 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.
- [13] 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.

- [14] ČSN EN 62137 – 1 – 3. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 3: Zkouška cyklickým padáním. 2009.
- [15] ČSN EN 62137 – 1 – 4. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 4: Zkouška cyklickým ohybem. 2009.
- [16] ČSN EN ISO18279 Tvrdé pájení – Vady v pájených spojích. 2004
- [17] ČSN EN 12799. Tvrdé pájení – Nedestruktivní zkoušení pájených spojů. 2002.
- [18] ČSN EN 12797 Tvrdé pájení – Destruktivní zkoušky pájených spojů. 2002
- [19] ADVANCED TECHNOLOGY GROUP S.R.O. *Radiografické zkoušení: Přehledový katalog výrobků a služeb*. [cit. 2013–05-25] Dostupné z: [http://www.atg.cz/cz/pdf/katalogy/RT/prehledovy\\_katalog\\_vyrobku\\_a\\_sluzeb\\_pro\\_rt.pdf](http://www.atg.cz/cz/pdf/katalogy/RT/prehledovy_katalog_vyrobku_a_sluzeb_pro_rt.pdf)
- [20] VYHODNOCOVÁNÍ RADIOGRAFICKÝCH ZKOUŠEK POMOCÍ VÝPOČETNÍ TECHNIKY, Ing. Michal Kořenář, *Příspěvek XV. mezinárodní konference soudních znalců – Brno, leden 2006* [online]. [cit. 2013–05-25] Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2006-03-149-151.pdf>
- [21] PT kapilární defektoskopie. *Nedestruktivní kontrola* [online]. 22.2.2009 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: <http://www.ndt.cz/?mnu=13>,
- [22] FREAR, D. R.; JANG, J.W.; LIN, J. K. aj. Pb – free solders for flip – chip interconnects [online]. [citováno 2013–04-26]. Dostupné z: <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0106/Frear-0106.html>
- [23] IPC-A-610. *Acceptability of Electronic Assemblies*. 2010.
- [24] Soldering Defects Database. *National Physical Laboratory* [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: [http://defectsdatabase.npl.co.uk/defectsdb/defects\\_query.php?](http://defectsdatabase.npl.co.uk/defectsdb/defects_query.php?)
- [25] Kontrola pomocí RTG. *SMT centrum* [online]. 2010 [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/kontrolni-systemy/kontrola-pomoci-rtg>

