

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Spolehlivost pájených spojů**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

**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-dopracování**  
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: **dle 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: **25. června 2013**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. srpna 2014**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 25. června 2013

## **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, pájitelnost, jakost, mechanické zkoušky, optické zkoušky, zkoušky pájitelnosti, 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, solderability, quality, mechanical testing, optical testing, solderability testing, non-destructive testing

## Prohlášení

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 25.8.2013

Filip Lomberský

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Wirthovi za cenné rady ohledně zdrojové literatury, zejména doporučení potřebných technických norem, které 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 .....	13
1.3.3 Strojní pájení přetavením .....	15
<b>2 VADY A POŽADAVKY NA SPOLEHLIVOST PÁJENÝCH SPOJŮ</b> .....	<b>16</b>
2.1 SPOLEHLIVOST PÁJENÉHO SPOJE .....	21
2.1.1 Jakost pájeného spoje .....	22
2.1.2 Životnost pájeného spoje .....	24
<b>3 ZKOUŠKY PÁJENÝCH SPOJŮ</b> .....	<b>25</b>
3.1 PŘEHLED NOREM PRO ZKOUŠKY PÁJENÝCH SPOJŮ .....	25
3.1.1 České normy .....	25
3.1.2 Mezinárodní normy .....	26
3.2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY .....	27
3.2.1 Zkouška stříhem .....	27
3.2.2 Zkouška odolnosti proti odtržení .....	30
3.2.3 Zkouška cyklickým padáním .....	31
3.2.4 Zkouška cyklickým ohybem .....	31
3.2.5 Únavová zkouška stříhem .....	32
3.3 ZKOUŠKY PÁJITELNOSTI .....	32
3.3.1 Ponořovací test .....	33
3.3.2 Kuličkový test .....	33
3.3.3 Metoda smáčecích vah .....	34
3.3.4 Test roztékavosti .....	36
3.3.5 Odolnost proti rozpuštění metalizace .....	36
3.3.6 Solder float test .....	36
3.4 OPTICKÉ (VIZUÁLNÍ) ZKOUŠKY .....	37
3.5 RADIOGRAFICKÁ ZKOUŠKA .....	38
3.6 ZKOUŠKA TEPLOTNÍM CYKLOVÁNÍM .....	39
3.7 SROVNÁNÍ METOD .....	39
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>42</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>43</b>



## **Seznam symbolů a zkratek**

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)
RTG.....	Označení pro rentgenové záření

## 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 jsem poté porovnal 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 k jejich selhání a tím i možné nefunkčnosti celého zařízení, ale i k dalším nebezpečným poruchám, jako jsou např. zkraty 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 součástek. 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 nižší teplotou tavení než mají spojované materiály. Je určena k pevnému spojování jiných materiálů (především 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 zejména 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 tak za přítomnosti tavidla (které odstraní z pájených povrchů nečistoty) zahřeje. Poté dojde k přiložení pájky, která se roztaví a spojí oba díly. Tato metoda se užívá zejména při opravách jednotlivých spojů, popřípadě pro jednorázovou výrobu elektroniky (např. pro výzkum).[1] [2]

#### 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 zvýšila se kvalita 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]

## 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 až 250 °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  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$ . 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 spolehlivost 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. [30]

Vznik vad je do velké míry ovlivněn použitými materiály (pájkami) a volbou pájecí metody. Některé druhy vad se tak vyskytují jen při použití určitých pájecích metod a jiné jsou nezávislé na technice pájení.

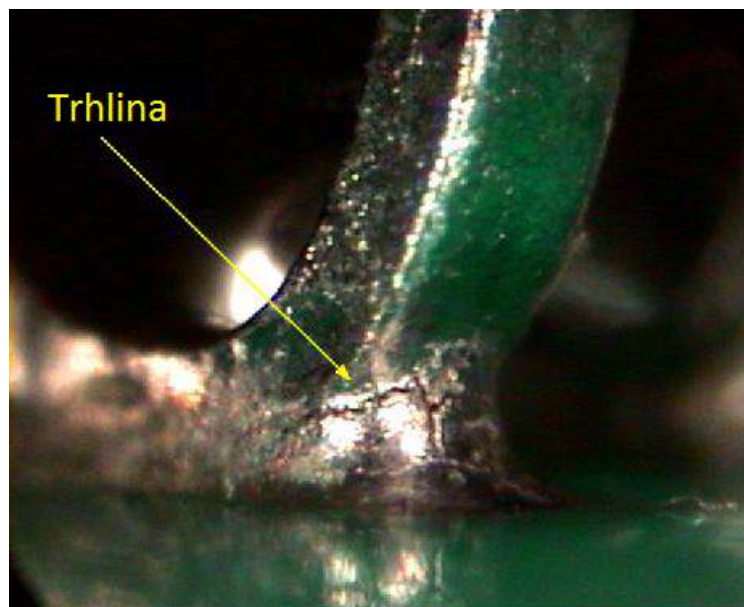


Vady lze rozdělit z hlediska jejich závažnosti takto:

- **Závažná vada** – vede k selhání případně citelně sníží použitelnost jednotky produktu pro jeho zamýšlený záměr.
- **Nepodstatná vada** – nesníží užitnost výrobku pro zamýšlený účel. Může způsobit pouze odchylku od zavedených standardů, která ovšem nemá vliv na funkci zařízení.
- **Vzhledová vada** – je pouze odchylkou, která nemá vliv na funkčnost ani životnost výrobku.

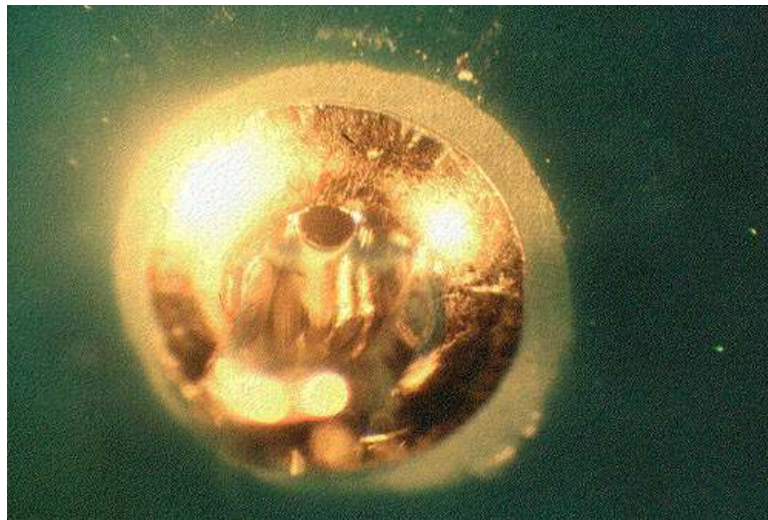
V pájeném spoji se může vyskytnout velké množství různorodých vad, uvedu proto nyní, dle mého názoru, jen ty nejvýznamnější.

- Trhliny (povrchové trhliny, praskliny v materiálu) – vznikají v důsledku mechanického namáhání spoje. Snižují mechanickou pevnost a spolehlivost spoje.[30] Příklad trhliny je uveden na obr. 2.1



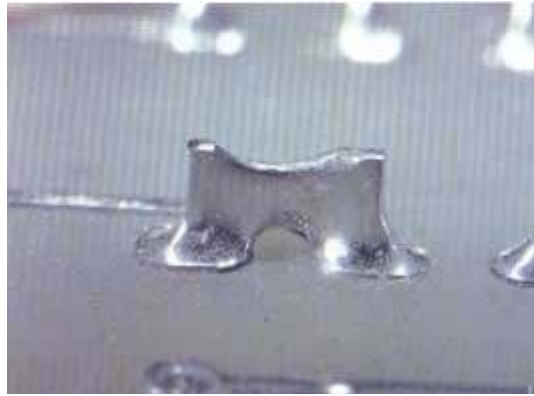
Obr. 2.1 Povrchová trhлина v pájeném spoji [15]

- Dírky v pájeném spoji (pin/blow holes) – vznikají během tuhnutí pájky. Na kuželu pájky se utváří dírka, způsobená unikající párou z desky plošného spoje (viz. obr.2.2). Pára se nejčastěji odpařuje z kontaminovaného tavidla nebo z tenké pokovené vrstvy DPS. Velikost dírky je závislá na množství unikajících par a na bodu tuhnutí pájky. Při velkém množství par se dá mluvit o tzv. kráteru v pájeném spoji. Důsledkem této vady je snížení mechanické pevnosti spoje, a tím i omezení spolehlivosti spoje.



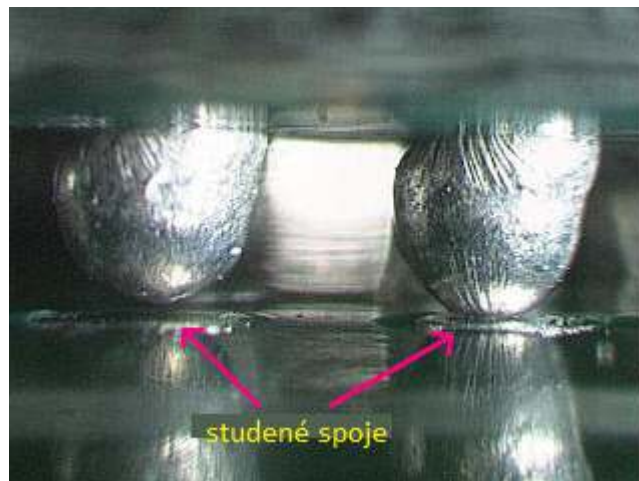
Obr. 2.2 Dírky v pájeném spoji [15]

- Pevné vměstky – jsou způsobeny nerovnoměrným rozlitím pájky nebo také nečistotami v pájce. Zhoršují mechanické vlastnosti spoje. [30]
- Pájkové můstky – vytvářejí se mezi vývody součástek (obr.2.3). Vznikají, zůstane-li pájka na dvou nebo více vývodech během tuhnutí. To má příčinu v použití velkého množství pájky, která může být i znečištěná, případně jsou-li vývody příliš dlouhé nebo se sníženou pájitelností. Současný trend zmenšování roztečí vývodů součástek nahrává jejich výskytu, jenž má vzestupnou tendenci. Můstky vytváří vodivé spojení dvou vodičů a tím negativně ovlivňují funkčnost celého obvodu a můžou vést ke zkratu.



Obr. 2.3 Pájkový můstek [15]

- Studený spoj (cold joint) – vyskytuje se u všech pájecích metod. Definuje se jako špatně smáčený, zašedlý pórovitý spoj (obr. 2.4). Vzniká v důsledku nedostatečného zahřátí spoje, při pájení přetavením nebo špatnou volbou rychlosti posuvu desky při pájení vlnou. Jeho vznik ovlivňuje i nesprávná volba tavidla a nečistoty v pájce nebo znečištěný povrch vývodů součástky. Má za následek snížení mechanické pevnosti spoje a omezení jeho spolehlivosti. [30]



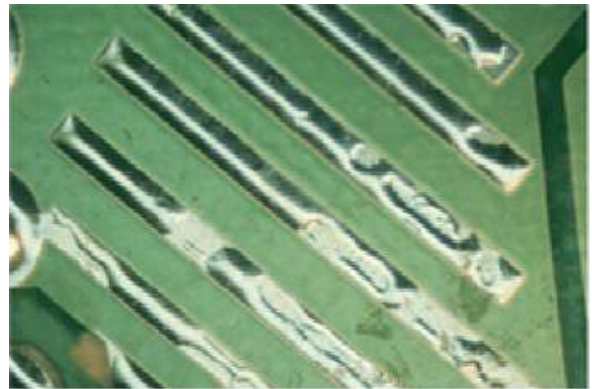
Obr. 2.4 Studený spoj [15]

- Nesmáčení – vada, při které se nevytvořila potřebná metalurgická vazba a rozhraní mezi pájkou a povrchem zůstane zřetelné i přesto, že byl povrch vystaven kontaktu s dostatečně roztavenou pájkou. Příklad nesmáčeného spoje je na Obr. 2.5. [30]

- Odsmásnění (dewetting) – stav, kdy se roztavená pájka stáhne zpět z pájeného povrchu, který byl předtím pájkou smáčen (obr. 2.6). Povrch DPS se pokryje nepravidelnými kapkami pájky, jenž jsou odděleny oblastmi s tenkou nebo žádnou vrstvou pájky. Tato vada se vyskytuje jak u pájení vlnou, tak i u pájení přetavením. Tato vada vzniká především v důsledku nedostatečné pájitelnosti (respektive smáčivosti) spojovaných povrchů.



Obr. 2.5 Nesmáčený spoj [15]



Obr. 2.6 Odsmásnění spoje [15]

Dále je možno vady dělit 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 [30]
- **vnitřní vady** – spadají sem, vnitřní trhliny, vady zaplnění pájkou, pevné vměstky, plynové kapsy, nedostatečné roztavení [30]

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.

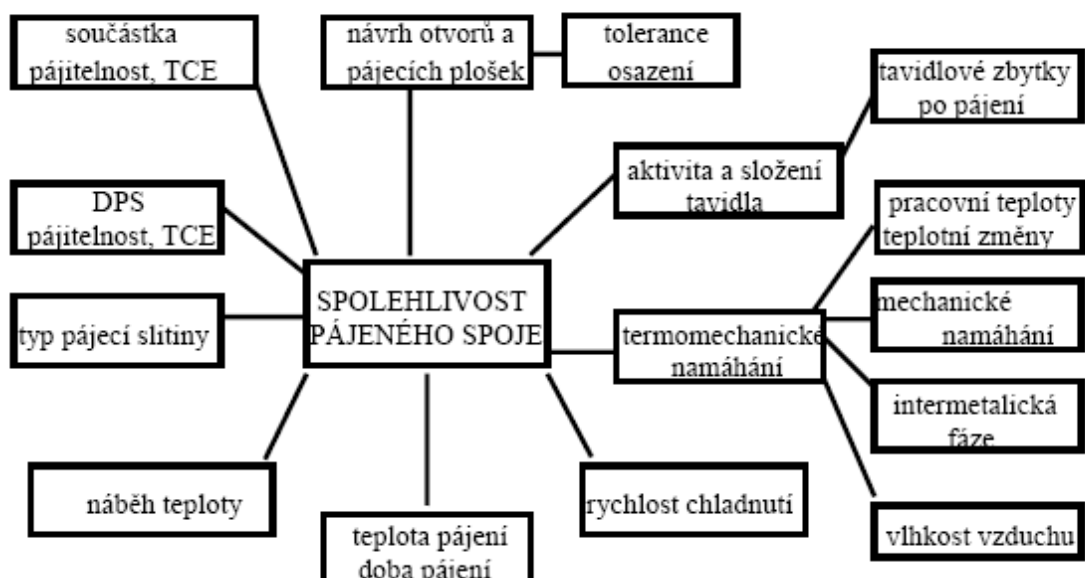
Z výše uvedeného vyplývá, že i malé vady mohou způsobit buďto selhání samotného spoje (například v důsledku jejich polohy ve spoji – způsobí menší odolnost spoje proti

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 Spolehlivost pájeného spoje

V ČSN 010102 je spolehlivost definována jako „Obecná vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek“ [34]. S pojmem spolehlivosti pájeného spoje souvisí zejména pojem jakost, ta je obecně definována jako: „Stupeň splnění požadavků souborem inherentních znaků“ [20]. Z výše uvedených skutečností tedy vyplývá, že spolehlivost a jakost pájeného spoje je dána především stálostí jeho vlastností jak v čase, tak i v požadovaných fyzikálních limitech.

Na spolehlivost spoje má vliv zejména kompatibilita pájených i pájecích materiálů i samotný proces pájení. Faktory ovlivňující spolehlivost jsou nejrůznější od čistoty samotné pájky po nejrůznější namáhání spoje (tepelné, mechanické). Důležité faktory jsou znázorněny na Obr. 2.7. Zásadní podmínkou pro vytvoření spolehlivého pájeného spoje je dobrá pájitelnost všech pájených částí, jak přívodů součástek, tak i plošného spoje. Pájitelnost je určena zejména dobrou smáčivostí. [21]



Obr 2.7 Faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje [21]

## Pájitelnost

Jedná se o komplex vlastností udávajících vhodnost pájených povrchů pro průmyslové pájení. Je dána zejména schopností povrchu pájených materiálů být smáčen roztavenou pájkou. Pájitelnost je možno posuzovat ze tří hledisek [22]:

- **smáčivost** – pájený povrch musí umožnit smáčení materiálu roztavenou pájkou po dobu pájení potřebnou pro vytvoření spolehlivého pájeného spoje bez vzniku odsmáčení, případně nedostatečného smáčení spojovaných materiálů. [22]
- **teplotní požadavek** – pájené součástky musí umožnit ohřev pájené na požadovanou teplotu pájení po požadovanou dobu. [22]
- **odolnost vůči teple při pájení** – tepelné namáhání pájených dílů nesmí ovlivnit jejich funkčnost a životnost.[22]

### 2.1.1 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] Ideální pájený spoj je charakterizován konkávním pájecím kuželem, lesklým a hladkým povrchem pájky (to platí pouze pro eutektické pájky, bezolovnaté mohou mít hrubý povrch) s dokonale smáčenými vývody součástek i pájecích plošek DPS. Takto vizuálně definovaný pájený spoj by měl mít i dostatečnou pevnost, jenž odpovídá kvalitě pájecího procesu.[21]

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]

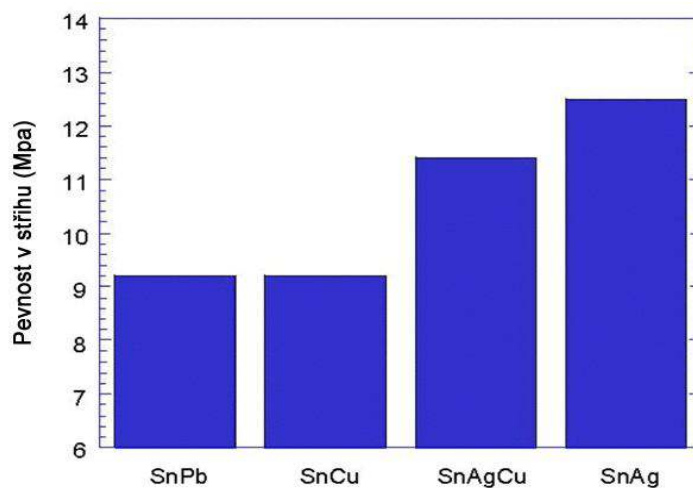
Tloušťka difúzní vrstvy je řádově v jednotkách mikrometrů, s rostoucím časem a zvýšeným tepelným namáháním může ovšem narůst až na desítky mikrometrů. Pájený spoj potom ztrácí své mechanické a elektrické vlastnosti, což může vést k jeho selhání. [10]

## 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 2.8 je příklad srovnání pevnosti ve stříhu pro různé slitiny pájek.



Obr. 2.8: Porovnání pevnosti v stříhu dle [13].

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]

### 2.1.2 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 ho 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 60068–2-69 Zkoušení vlivů prostředí – Část 2–69: Zkoušky – Zkouška Te: Zkoušení pájitelnosti elektronických součástek pro technologii povrchové montáže (SMD) metodou smáčecích vah** – Definuje průběh a požadavky pro zkoušku pájitelnosti metodou smáčecích vah.
- **ČSN EN ISO 12224–3 Plný a tavidlem plněný pájecí drát – Specifikace a zkušební metody – Část 3: Zkouška účinnosti tavidlem plněného pájecího drátu metodou smáčecích vah** – Určuje zkoušku metodou smáčecích vah pro tavidlem plněné pájecí dráty.

- **ČSN EN 60068–2-58 ed. 2 (345791) 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** – Definiuje pájitelnost, její parametry a také zkoušku odolnosti vývodů součástek proti rozpouštění metalizace.
- **ČSN EN 29455–5. Tavidla pro měkké pájení zkušební metody. Část 5: Zkouška na měděném zrcadle** – Norma pro test roztékavosti (jedna ze zkoušek pájitelnosti).
- **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).
- **IPC/EIA J-STD-003A – Solderability Tests for Printed Boards** – Zkoušky pájitelnosti pro desky plošných 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).
- **JESD22-A104D: Temperature Cycling** – Definiuje zkoušku teplotním cyklováním
- **IEC 62137 – 1 – 5. Surface mounting technology – Environmental and endurance test methods for surface mount solder joints – Part 1-5: Mechanical shear fatigue test** – Definiuje únavovou zkoušku stříhem pro povrchově montované spoje.
- **IPC – S – 805 Solderability Tests for Komponent Leads and Terminations** – Zkoušky pájitelnosti pro kontakty a vývody součástek.

## 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 vedou ke zničení spoje nebo spojovaných dílů a součástí. [8]

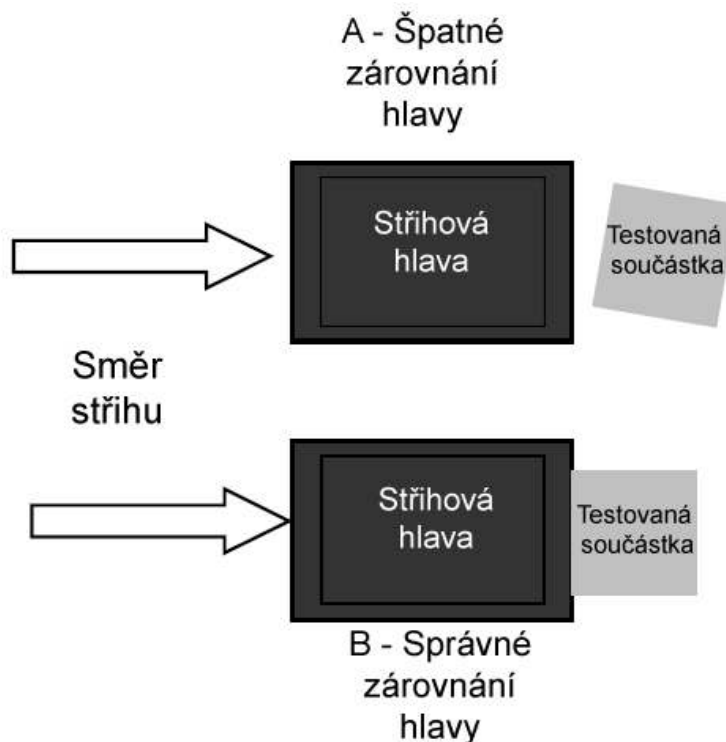
### 3.2.1 Zkouška stříhem

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, odolnosti 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 utrnutí součástky v pájeném spoji. Tato síla je odlišná pro různé typy pájek. [8] [24] [25]

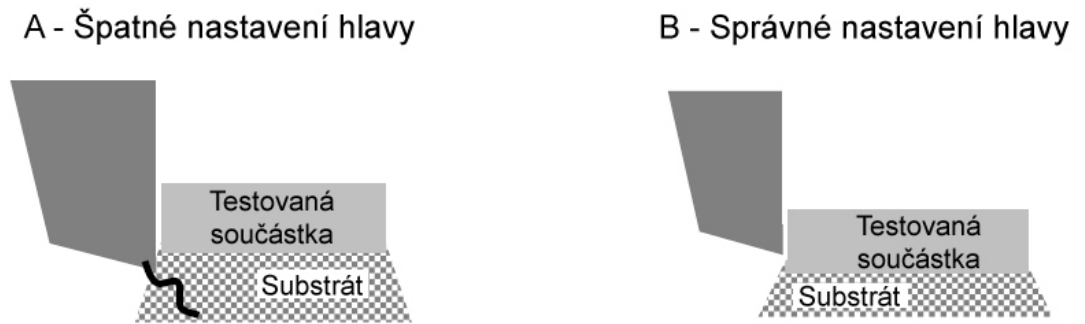
Zkouška se běžně provádí při pokojové teplotě, ale může se provádět i po umístění vzorku v komoře se zvýšenou teplotou nebo po teplotním cyklování. Při použití teplotního cyklování je normou ČSN EN 62137 – 1 – 2 doporučeno cyklování od -40 do +125 °C, přičemž změna teploty od spodní hranice po horní 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. Správné nastavení zarovnání a výšky stříhové hlavy je na obr. 3.1. [9] [25]

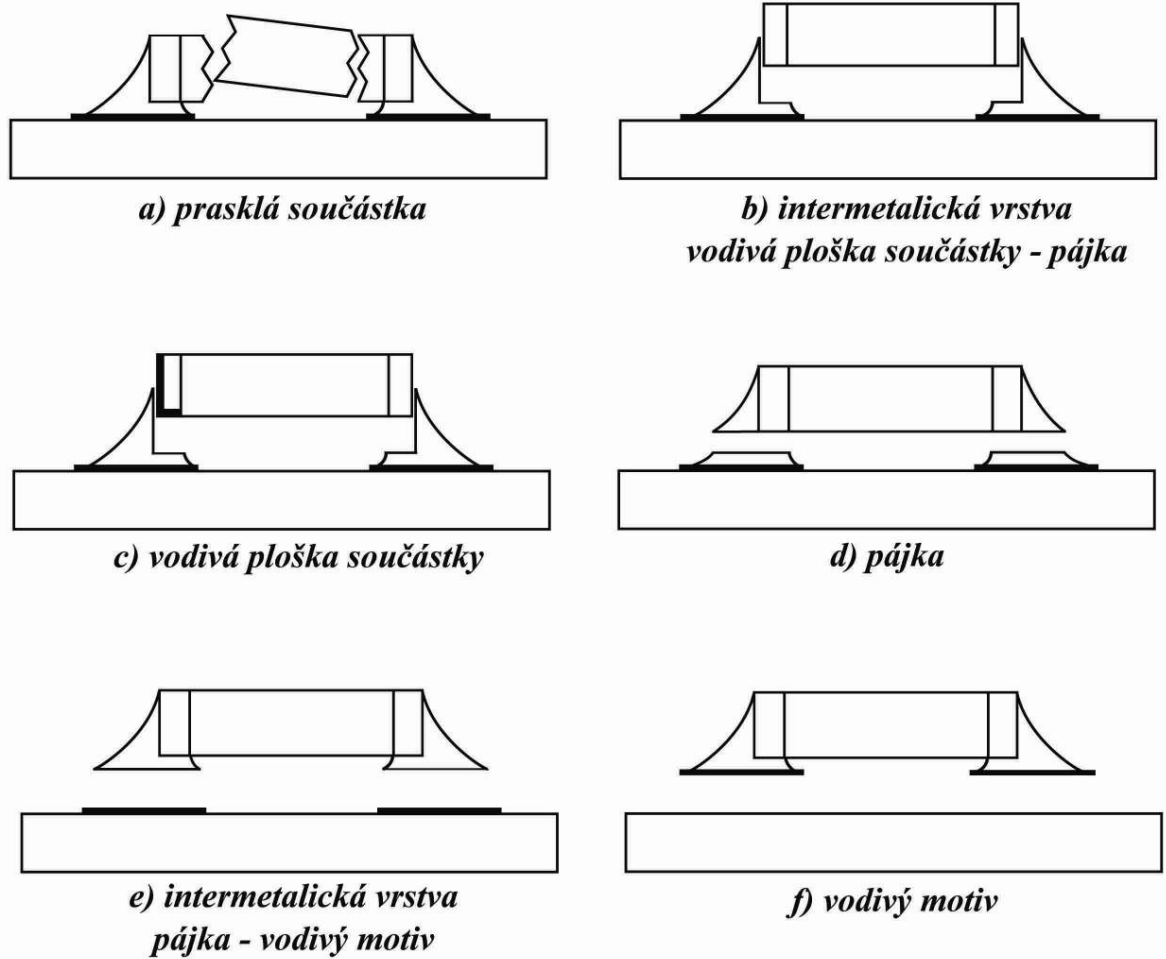


Obr. 3.1: Nastavení zarovnání stříhové hlavy. [9]

Dalším parametrem, který se nastavuje, je výška hlavy. Dle normy musí stříhová hlava tlačit 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. Správné nastavení je na obr. 3.2. 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 maximální působící síla se následně zaznamená. Na obr. 3.3 jsou příklady možných selhání spoje při tomto testu. [8] [25]



Obr. 3.2: Nastavení výšky stříhové hlavy. [9]

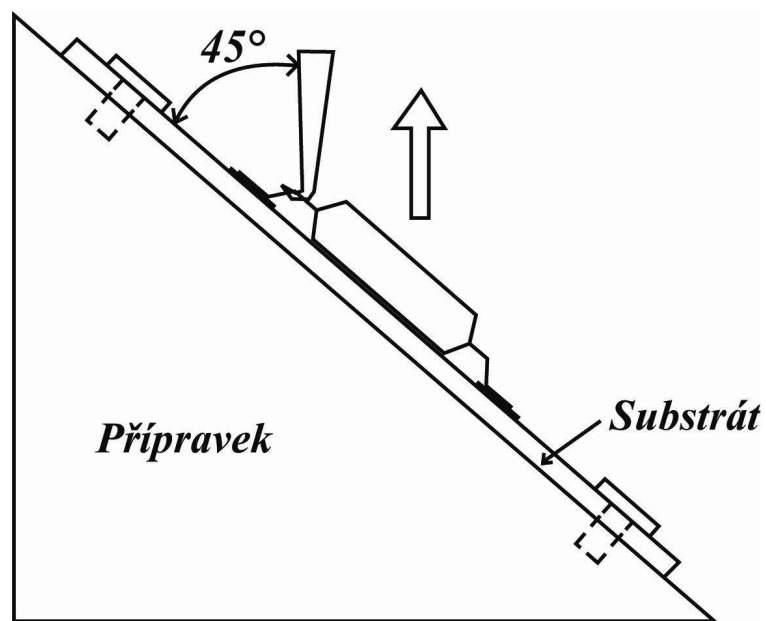


Obr. 3.3: Místa utržení při testu stříhem [25].

### 3.2.2 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. Testovací přípravek a průběh zkoušky je znázorněn na obr. 3.4. Tato metoda je destruktivní a může dojít k zjištění následujících poruch: [26]

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



Obr. 3.4: Zkouška odolnosti proti odtržení [26]

### 3.2.3 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. [27] Příklady chyb vedoucích k přerušení obvodu: [27]

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

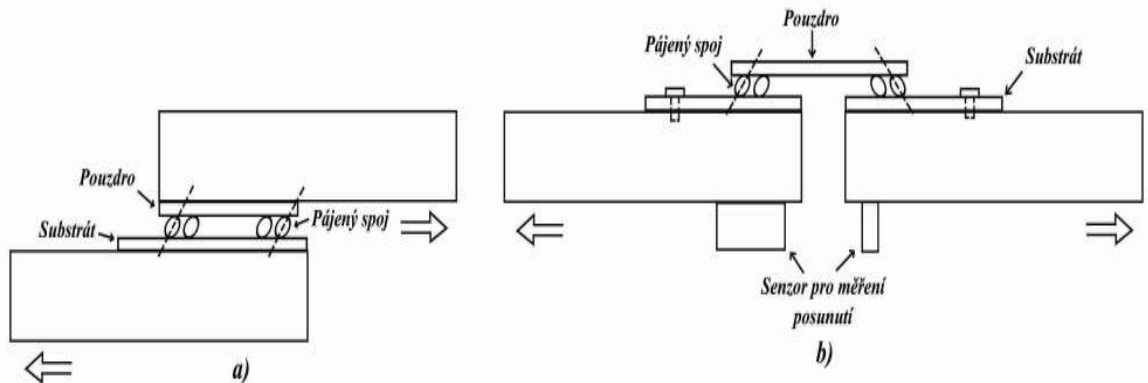
### 3.2.4 Zkouška cyklickým ohybem

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. [28]

### 3.2.5 Únavová zkouška stříhem

Tato metoda je uvedena v normě ČSN EN 62137 – 1 – 5. Testovaná deska se umísťuje do přípravku navrženého pro tento typ zkoušky. Spoj je poté opakovaně zatěžován stříhovou silou, dokud nedojde k jeho selhání (může se projevit elektrickým přerušením). Poté je test zastaven a zaznamená se výsledný počet cyklů. Velikost rozsahu posunutí se nastavuje v rozmezí  $\pm 0,001$  až  $\pm 0,1$  mm a rychlost posunutí je v rozmezí 0,001 až 0,01 mm/s. V normě jsou popsány tři možné způsoby testování. První způsob se užívá k testování jednotlivých pájených spojů, zbylé dva, které jsou na obr. 3.5, testují již hotové sestavy se zapájenou součástí. [29]



Obr. 3.5: Užívané metody pro únavovou zkoušku stříhem

### 3.3 Zkoušky pájitelnosti

Pájené povrchy (vývody součástek, substráty) mají obecně velmi rozdílné vlastnosti, které samozřejmě mají vliv na kvalitu pájeného spoje. Nejdůležitější vlastností je smáčivost. Ta určuje, jak dobře se bude pájka rozlévat po pájených plochách. K určení nejen smáčivosti se užívá několik zkoušek tzv. pájitelnosti. Ty zkoumají dva hlavní faktory. Počáteční smáčivost povrchů před pájením a rozsah odsmáčení během pájení.

Zaměřím-li se na jednotlivé zkoušky, je možné nalézt několik nejužívanějších metod. Patří mezi ně ponořovací test, kuličkový test, metoda smáčecích vah, test roztékavosti a také test odolnosti proti rozpuštění metalizace.

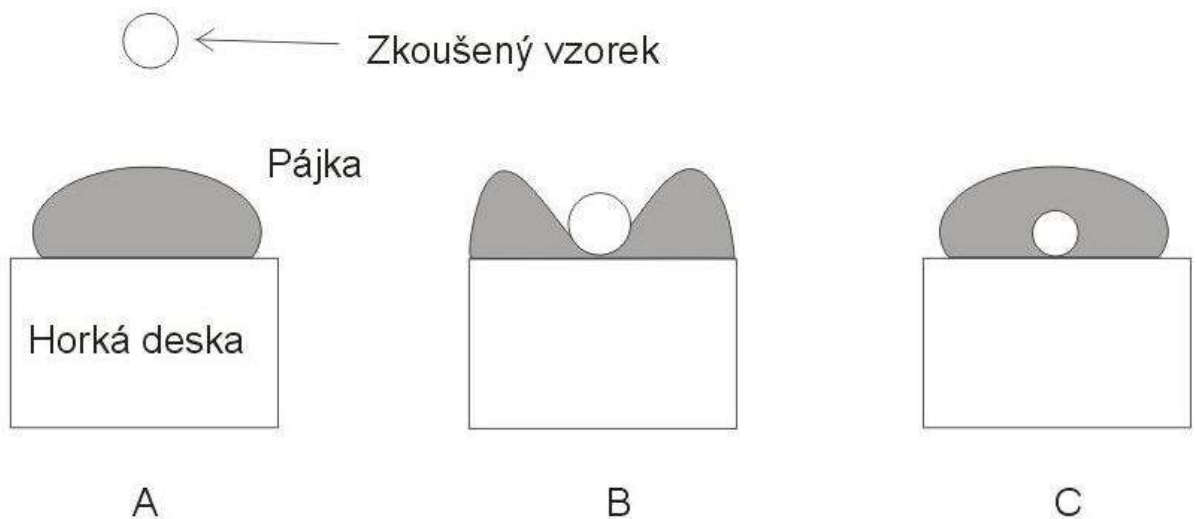


### 3.3.1 Ponořovací test

Je definován v normě ČSN EN 61760–1. Nejsnáze se pájitelnost kontaktů součástek testuje jejich ponořením do nádoby s roztavenou pájkou. Tento test je vhodný jak pro kontakty součástek, tak pro substráty pro DPS. Lze jej provést ručně i mechanizovaně. Po vytažení z lázně se vizuálně určí stupeň smáčení. Procentuální plochu smáčení, stupeň odsmáčení (rozpuštění) a rozsah znečištění vývodů určuje pověřený pracovník. Z toho je patrné, že nevýhodou této zkoušky je závislost na vizuální subjektivní interpretaci výsledků – lidském faktoru. [1] [18]

### 3.3.2 Kuličkový test

Na horké desce se zahřeje kapka pájky na bod tavení a zahřátý testovaný vývod součástky (pokud možno válcového tvaru) je umístěn nad střed kuličky, to je znázorněno na obr. 3.5. Vývod se poté ponoří do kuličky, pájka tak na určitou dobu zůstane rozpůlena, dokud se smáčením nespojí. Test tedy zjišťuje dobu potřebnou pro smáčení. Ta se určí buď automatickými systémy, nebo vizuálně. Kuličkový test je nejvhodnější pro vývodové (tedy THT) součástky. [1]

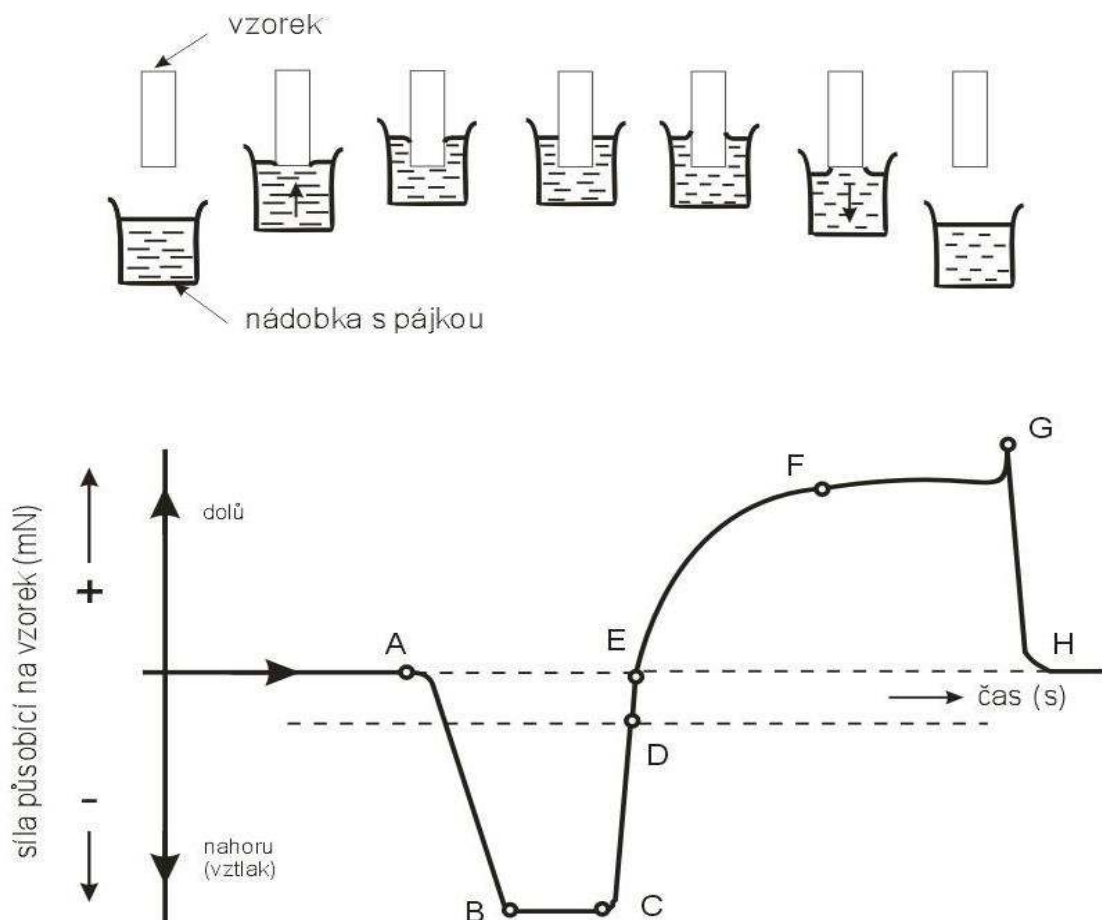


Obr. 3.6: Umístění vzorku při kuličkovém testu

### 3.3.3 Metoda smáčecích vah

Je dána normou ČSN EN 60068–2-69 popřípadě je možné ji nalézt také v normě ČSN EN ISO 12224–3 a i ve vojenských normách MIL nebo v mezinárodních normách IPC. Metoda zajišťuje kvantitativní výsledky vhodné pro analýzu základních vlastností kontaktů součástek. Tuto metodu lze použít i pro charakteristiku pájitelnosti substrátů.

Zkouška probíhá takto: na kontakt součástky (popřípadě DPS) je naneseo tavidlo. Zkoušený vzorek je poté připevněn k siloměru a zavěšen nad nádobu s roztavenou pájkou. Nádobka s roztavenou pájkou se pohybuje vzhůru díky řízenému krokovému motorku (elektronické řízení dovoluje měnit rychlost zdvihu a tak i rychlost ponoru) a kontakt se tím ponoří do pájky. Siloměr měří a zaznamenává síly působící na měřený vzorek. [17] Na obr.3.5 je uveden příklad průběhu zkoušky i se změnami velikosti a směru síly působící na vzorek (v tomto případě válcového tvaru).



Obr. 3.7: Průběh metody smáčecích vah [17]

Průběh zkoušky [17]:

- Bod A: Vzorek je ponořen do pájky velkou silou. Je to počáteční bod styku vzorku s pájkou. Pro podporu smáčení má vzorek příliš nízkou teplotu. Sklon křivky mezi body A a B je dán rychlostí ponoru.
- Bod C: Pájka smáčí vzorek. Nejprve vytlačuje vzorek směrem vzhůru, s rostoucím smáčením je ovšem vzorek působením povrchového napětí tažen na druhou stranu, tedy dolů. V důsledku toho je třeba vyvinout určitou sílu na jeho vytažení zpět nahoru, viz následující body (D-F).
- Bod D: Síla v tomto bodě se rovná vztlakové síle (vypočítá se z rozměru vzorku, měrné hmotnosti pájky a hloubky ponoru). V tomto momentě je povrch pájky kolmý k povrchu vzorku.
- Bod E: Výslednice působících sil je nulová (jsou v rovnováze).
- Bod G: Vytažení vzorku z lázně (vrchol křivky).
- Bod H: Konečný stav

Pájitelnost je charakterizována veličinou  $S$ . Následující vzorec slouží k výpočtu této veličiny. Ta je definována jako podíl smáčecí síly v čase 2 s a součinu maximální vytahovací síly s dobou smáčení. [17]

$$S = \frac{F_{St2}}{F_{S \max} \times t_s}$$

$F_{st2}$  – smáčecí síla ve druhé sekundě

$F_{s \max}$  – maximální vytahovací síla

$t_s$  – doba smáčení

Měřením bylo zjištěno, že dobrá pájitelnost je, pokud  $S = 5$  až 6. Nižší hodnoty již vykazují odsmáčení. [17]

### 3.3.4 Test roztékavosti

Tato metoda se užívá k měření roztékavosti pájecí slitiny nebo k měření aktivity použitého tavidla. Předpoklad je, že předem známé množství pájky je umístěno na měděný povrch. Na něm se dá regulovat tloušťka oxidace. Pájka je nastavena po změření množství tavidla, jež se aplikuje. Aktivitu tavidla nebo schopnost pájecí slitiny se roztékat určuje plocha, v níž se pájka rozprostře. Některé normy místo poměrně pracného vyhodnocení roztečené plochy dávají přednost měření výšky po roztečení. [33] [1]

### 3.3.5 Odolnost proti rozpuštění metalizace

Během pájecího procesu se povrch spojovaných částí rozpouští. Tato zkouška tedy hodnotí velikost rozpuštění. Je definována v normě ČSN EN 60068-2-58. Je možné ji použít také u součástek, které mají pájitelný povrch nanesený na základní vrstvě z drahých kovů, jako jsou například tranzistory a čipové rezistory. Zkušební zařízení je pro tuto metodu stejné jako u ponořovacího testu, mění se ovšem podmínky testu, aby se urychlilo rozpouštění. Teplota pájení dle normy by měla být  $260 \pm 5^\circ\text{C}$  a setrvačnost  $30 \pm 1\text{s}$ . Zkouška je založena na měření množství metalizace ztracené během testu. Žádaný výsledek je ten, že kombinovaná ztráta ze všech nesmočených ploch by neměla být větší než 10% plochy elektrody, s žádnou samostatnou plochou přesahující 5%. Vnitřní elektrody by neměly být exponovány. Tento parametr lze také měřit kvantitativně pomocí smáčecí váhy. [19]

### 3.3.6 Solder float test

Tato zkouška není v českých normách, je uvedena v zahraniční normě IPC/EIA J-STD-003A. Je vhodná pro zjištění pájitelnosti povrchů PCB a pro povrchy s pokovenými otvory. Zkušební vzorky by měli mít rozměry 50 x 50 mm a minimální počet pro test by měl být alespoň 6 kusů. V případě vzorku s pokovenými otvory by to mělo být v počtu 30 kusů s tím, že jeden vzorek může obsahovat 5 pokovených děr. Zkouška probíhá tak, že se zkoušený vzorek umístí pomocí nerezové pinzety na hladinu roztavené pájky, kde se nechá plovat maximálně po dobu 5s. Vzorek se však nesmí potopit přes 50% jeho tloušťky. Po vytažení se vzorek musí postavit do horizontální polohy a počkat dokud pájka neztuhne. Při rozhodnutí o pájitelnosti se při tomto testu zkoumá hlavně velikost smáčení ponořené části vzorku.[35]

### 3.4 Optické (vizuální) zkoušky

Tento druh testů se řadí dle normy ČSN EN 12799 mezi nedestruktivní metody testování pájených spojů. Je možné je užit 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)**

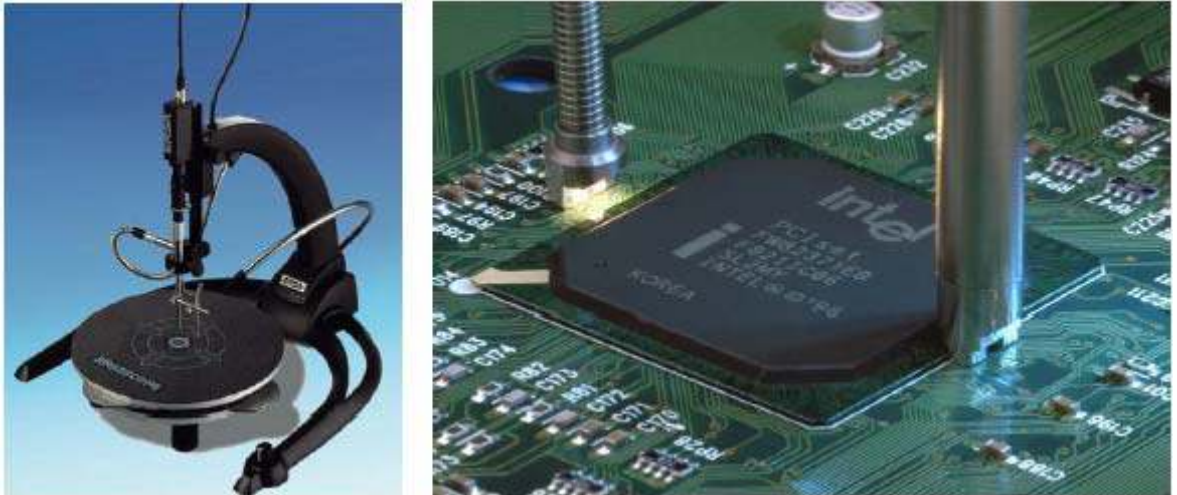
Je to nejjednodušší a nejlevnější metoda optických zkoušek. Nejdůležitějším kritériem je zde kvalita zraku operátora provádějícího zkoušku a jeho zkušenost. Kvalita zraku pracovníka má být ověřena podle článku 6.3 EN 473 1993. Pracovník také musí být dostatečně obeznámen s užitým postupem pájení (technologíí výroby) a musí znát možné vady vyskytující se v takto zapájeném spoji. [1] [31]

- **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] [31]

- **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. Příklad kontrolního zařízení je na obr. 3.8. [1] [5]



Obr. 3.8: Optický kontrolní systém ERASCOPE.[23]

### 3.5 Radiografická zkouška

Je uvedena v normě ČSN EN 12799, která je sice pro oblast tvrdého pájení, ale tuto zkoušku lze uplatnit i ve výrobě elektroniky. 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. [12] [31] [16]

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. [11] [31]

### 3.6 Zkouška teplotním cyklováním

Je možné ji nalézt např. v normě JESD22-A104D. Jde o jednu z nejdůležitějších metod užívaných ke zjištění životnosti a spolehlivosti pájeného spoje. Její princip spočívá v opakovaném zatěžování spoje změnami teploty v daném rozsahu. Ten se pro různá zařízení liší a měl by přibližně odpovídat rozsahu teplot, v kterých se bude pájený spoj nacházet. Existuje několik typů cyklů pro různá zařízení, které se dělí dle jejich zamýšleného použití a dle užitého rozsahu teplot. [14]

- Cyklus A – Užívá se v armádních aplikacích. Z důvodu vysokých nároků na kvalitu jednotlivých spojů se užívá velký rozsah teplot od -55°C do 125°C (tedy rozdíl 180°C). [14]
- Cyklus B – Má užití v leteckém a automobilovém průmyslu, kde jsou požadavky na kvalitu podobné jako v předchozím případě, tudíž se v tomto cyklu užívá stejný rozsah teplot. [14]
- Cyklus C – Použití nachází v telekomunikační technice, užívaný rozsah teplot je -20°C až 100°C (rozdíl 120°C) [14]
- Cyklus E – Používá se ve spotřební elektronice. Rozsah teplot je v tomto případě pouze 60°C. [14]

### 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). Pro určení spolehlivosti spojů jsou také velice důležité zkoušky pájitelnosti.

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  $10 \text{ mm}^2$ , pro flip-chip technologii a pro flexibilní substráty.

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.

Obě cyklické zkoušky padáním a ohybem spolu s únavovou zkouškou stříhem 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. Únavová zkouška stříhem se užívá především pro součástky s pouzry typu BGA. To samé platí i pro zkoušku cyklickým ohybem, kterou je možné užít i pro pouzdra typu QFP. Zkouška cyklickým padáním se používá hlavně u přenosných zařízení, jímž hrozí opakované namáhání při pádu a zaměřuje se především na součástky s více vývody, u kterých je vyšší pravděpodobnost poškození některého z pájených spojů.

Zkoušky pájitelnosti mají velký význam pro zvýšení spolehlivosti výsledných pájených spojů. Mohou přispět k omezení některých vad, jako jsou studené spoje, odsmáčení, atd. Je možné je porovnat dle různých kritérií, já jsem se rozhodl pro srovnání dle jejich přesnosti.

Z tohoto srovnání vychází jako nejpřesnější metoda smáčecích vah, protože udává přesné kvantitativní výsledky. Podobně, i když o něco méně přesné jsou kuličkový test a test roztékavosti, který se užívá pro zjištění správné funkce tavidla popřípadě pájecí slitiny. Tyto testy mají ovšem oproti metodě smáčecích vah velkou výhodu v jejich jednoduchosti, technologické nenáročnosti, nižších nákladech na testování a také v nižších požadavcích na kvalifikaci pracovníků provádějících zkoušku.

Velmi rozšířenou zkouškou pájitelnosti je ponořovací test (v angličtině Dip and Look). Mnoho firem ho užívá především kvůli jeho technologické nenáročnosti a nízkým nákladům na testování jednoho vzorku. Nevýhoda této metody ovšem spočívá v její nepřesnosti, způsobené subjektivním hodnocením výsledků pracovníkem provádějícím test.



Protože test odolnosti proti rozpuštění metalizace využívá stejné zkušební zařízení jako ponořovací test, je jeho technologická náročnost a nákladnost téměř stejná. Stejně jako u předchozí metody jsou výsledky tohoto testu ovlivněny subjektivním hodnocením zkoušejícího pracovníka.

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. Také se nehodí pro pouzdra součástek s vývody umístěnými vespod pod součástkou jako je např. BGA, i když v současnosti se na trh pomalu dostávají optické kontrolní systémy schopné nahlédnout i pod součástky. Přesto je vhodnější pro kontrolu těchto skrytých spojů užití RTG kontroly, díky které je možné odhalit i vady uvnitř spoje. Její velkou nevýhodou je ovšem vysoká cena zkušebního zařízení, proto se tato zkouška užívá především pro drahé výrobky vyžadující vysokou kvalitu spojů. Obě tyto zkoušky jsou nedestruktivní a tak je možné je užít ke kontrole všech vyrobených kusů a ne jen vybraných vzorků.

Jako poslední ještě zmíním zkoušku teplotním cyklováním. Ta se užívá v kombinaci s ostatními výše popsány zkouškami (mimo zkoušek pájitelnosti). S její pomocí je možné přesně určit životnost a spolehlivost spoje při delším tepelném namáhání. Užití této zkoušky není omezeno typem součástek ani počtem nebo umístěním jejich vývodů.

## 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, přes zkoušky pájitelnosti po nedestruktivní optickou a radiografickou kontrolu. Také zde srovnávám jednotlivé metody z hlediska jejich uplatnění ve výrobě elektronických zařízení.

Z tohoto srovnání vyplívá, že naprostá většina mechanických (destruktivních) zkoušek je uplatnitelná v kontrole jakosti povrchově montovaných pájených spojů, každá samozřejmě pro jiný druh součástek. Důležitými zkouškami jsou zkoušky pájitelnosti, které sice nezjišťují spolehlivost hotových spojů, ale významně napomáhají k odstranění nežádoucí faktorů před pájením i během pájení (např. studené spoje nebo nedostatečně smáčené spoje), které snižují spolehlivost výsledných pájených spojů. 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, v případě některých sestav kde jsou skryté spoje, které nelze jinak kontrolovat, je i dokonce nezbytná. Ovšem vzhledem k vysokým nákladům na zkušební zařízení se přesto užívá v menší míře.

V práci jsem se snažil o shrnutí problematiky spolehlivosti pájených spojů a o přehled nejužívanějších (normovaných) zkoušek pájených spojů. Pokrytí všech existujících zkoušek však velmi přesahuje rozsah této práce.

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] 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)
- [12] 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>

- [13] 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>
- [14] SZENDIUCH, Ivan. Základy technologie mikroelektronických systémů obvodů systémů. VUTIUM, 2006 [cit. 2013-07-28], 378s.
- [15] 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?)
- [16] Kontrola pomocí RTG. *SMT centrum* [online]. 2010 [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/kontrolni-systemy/kontrola-pomoci-rtg>
- [17] Metoda smáčecích vah. *SMT centrum* [online]. 2010, 8.5.2010 [cit. 2013-07-07]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/metoda-smacecich-vah/>
- [18] Ponořovací test. *SMT centrum* [online]. 2010, 10.5.2010 [cit. 2013-07-07]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/ponorovaci-test/>
- [19] Odolnost proti rozpuštění metalizace. *SMT centrum* [online]. 2010, 6. 5. 2010 [cit. 2013-07-07]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/odolnost-proti-rozpusteni-metalizace/>
- [20] E-ISO slovník. *EISO.cz* [online]. c2006 [cit. 2013–07–17]. Dostupné z: <http://www.eiso.cz/informacni-servis/eiso-slovník/>
- [21] FAJKUS, Martin. *Spolehlivost pájeného spoje a faktory, které ji ovlivňují*. 2009, 5 s. [cit. 2013–07–17]. Dostupné z: <http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/spolehlivost-pajeneho-spoje-a-faktory-kt-ji-ovlivnuji-m10817-p1.html>
- [22] HARANT, Petr a František STEINER. Testování pájitelnosti metodou smáčecích vah. [online]. 2007, s. 5 [cit. 2013–07–26]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/392/r0c1c8.pdf;jsessionid=645F22CA5F99A2A70D57E96A4F0ABD09?sequence=1>
- [23] ADÁMEK, Martin, Cyril VAŠKO a Miloš DRLÍK. *Pájení v elektrotechnické výrobě: Kontrola jakosti spojů* [online]. 14 s. [cit. 2013-08-20]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L04b\\_p%C3%A1jen%C3%AD\\_a\\_kontrola.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L04b_p%C3%A1jen%C3%AD_a_kontrola.pdf).
- [24] ČSN EN 60749 – 19. Polovodičové součástky – Mechanické a klimatické zkoušky – část 19: Zkouška pevnosti čipu stříhem. 2003.
- [25] 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.

- [26] 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.
- [27] ČSN EN 62137 – 1 – 3. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 3: Zkouška cyklickým padáním. 2009.
- [28] ČSN EN 62137 – 1 – 4. Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 4: Zkouška cyklickým ohybem. 2009.
- [29] 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.
- [30] ČSN EN ISO18279 Tvrdé pájení – Vady v pájených spojích. 2004
- [31] ČSN EN 12799. Tvrdé pájení – Nedestruktivní zkoušení pájených spojů. 2002.
- [32] ČSN EN 12797 Tvrdé pájení – Destruktivní zkoušky pájených spojů. 2002
- [33] ČSN EN 29455-5. *Tavidla pro měkké pájení zkušební metody. Část 5: Zkouška na měděném zrcadle.* 1995.
- [34] ČSN IEC 50(191) (010102). *Medzinárodný elektrotechnický slovník. Kapitola 191: Spoľahlivosť a akosť služieb.* 1993.
- [35] IPC/EIA J-STD-003A Joint industry standard – *Solderability Test for Printed Boards*, February 200

