

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Diagnostika propojovacích struktur**

**vedoucí práce: Ing. Václav Wirth**

**autor: Ladislav Netrh**

**2012**

*Zadání BP*

## **Anotace**

Bakalářská práce je zaměřena na seznámení s propojovacími strukturami plošných spojů, jejich základními vlastnostmi a použitím v elektrotechnickém průmyslu. V diagnostické části je sledována problematika těchto propojovacích struktur při procesu propojování ve výrobě, kde sledujeme možný vznik chyb při kompletaci výrobku. Podrobněji je sledováno rozpoznávání vzniklých chyb při procesu propojování na deskách plošných spojů.

## **Klíčová slova**

Pájení, lepení, bondování, diagnostika propojování, chyby propojovacích struktur

## **Diagnostics of interconnection structures**

### **Abstract**

This bachelor thesis is focused on familiarization with the interconnecting structures of printed circuit boards, their basic properties and use in the electronics industry. In the diagnostics part of this work is monitored by the issue of interconnection structures in the proces of linking in production, where we observe the emergence of possible errors in product assembly. More detail is observed recognition errors incurred in the process of connecting to the printed circuit boards.

### **Key words**

Soldering, gluing, bonding, diagnostics of interconnection, errors of interconnection structures

## **Prohlášení**

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

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury, pramenů uvedených v seznamu a dalších informačních zdrojů, které jsou součástí této bakalářské práce.

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

V Plzni, 4.6.2012

Ladislav Netrh

.....

## **Poděkování**

Tímto bych velice rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Václavu Wirthovi, za příkladné metodické vedení a cenné rady, které mi poskytl během vypracování bakalářské práce.

# Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>7</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>9</b>
<b>1 PROPOJOVACÍ STRUKTURY .....</b>	<b>10</b>
1.1 ÚVOD DO PROPOJOVACÍCH STRUKTUR.....	10
1.2 SEZNÁMENÍ S PROBLEMATIKOU PROPOJOVACÍCH STRUKTUR .....	10
1.2.1 Pájení .....	10
1.2.2 Lepení.....	18
1.2.3 Bondování .....	24
<b>2 DIAGNOSTIKA CHYB U PROPOJOVACÍCH STRUKTUR.....</b>	<b>30</b>
2.1 POPIS MOŽNÝCH CHYB PŘI PROCESU PROPOJOVÁNÍ .....	30
2.1.1 Vznik chyb u pájení .....	30
2.1.2 Vznik chyb u lepení.....	34
2.1.3 Vznik chyb u připojování mikrodrátky.....	35
2.2 PŘEHLED APLIKOVATELNÝCH METOD DIAGNOSTIKY CHYB .....	37
2.2.1 Diagnostikování kvality pájených a lepených spojů .....	38
2.2.2 Diagnostikování kvality spojů vytvořeného mikrodrátkem .....	39
2.3 KONTROLNÍ METODY A SYSTÉMY .....	40
2.3.1 Optické kontroly .....	40
2.3.2 Elektrické kontroly .....	46
2.3.3 Klimatické kontroly .....	50
2.3.4 Mechanické kontroly.....	50
<b>3 POROVNÁNÍ DIAGNOSTIKOVÁNÍ CHYB.....</b>	<b>51</b>
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>55</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>56</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>59</b>

## Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na diagnostiku propojovacích struktur, která se zabývá popisem možných chyb, které mohou vzniknout při procesu propojování v průběhu celé výroby. Pomocí diagnostických metod je možné rozpoznat vzniklé chyby, které je možné následně odstranit. Aplikované metody diagnostiky v této bakalářské práci jsou dále porovnány pro jednotlivé propojovací struktury.

Měli bychom si uvědomit, že diagnostika propojovacích struktur úzce souvisí s vývojem elektroniky. V dnešní době nás moderní elektronika doprovází doslova na každém kroku, bez ohledu na to, kde se právě nacházíme. Především se jedná o výpočetní a telekomunikační techniku, která je dnes běžně rozšířena mezi veřejnost a disponuje s ní velká část obyvatelstva. S touto velkou technickou rozšiřitelností souvisí rychlý rozvoj a vývoj nových používaných materiálů a technologií, určených právě pro elektroniku. Používané technologie při výrobě se snaží být co nejméně nákladné a co nejvíce spolehlivé, aby se nezvyšovaly náklady na výrobu.

Pro další vývoj elektroniky je důležitá nejen nejlevnější výrobní technologie, ale také diagnostika propojovacích struktur jednotlivých součástek a spojů v daném elektrickém zařízení. Diagnostika propojovacích struktur nám pomáhá zlepšovat úroveň spolehlivosti a odolnosti mechanického, tepelného a elektrického namáhání, to má za následek zdokonalování výrobních postupů a technologií, které se tak stávají levné, odolné, spolehlivé a na výrobu nenáročné. Tento oboustranný technologický vývoj jde ruku v ruce vždy společně. Vzájemně se velmi ovlivňují a především si doplňují své nedostatky, které se postupným zlepšováním technologií odstraňují.

Samozřejmostí je, že tyto zdokonalené technologické postupy nám posouvají samotnou elektroniku dále, ale i nejrůznější odvětví, ve kterých má elektronika svá zastoupení. Pokud se ohlédneme nazpět, tak v krátkém časovém úseku šel vývoj elektroniky rapidně vpřed. To má za následek přínos mnohých výhod v každodenním životě.

## Seznam symbolů a zkratek

### Symbole

<i>Symbol veličiny</i>	<i>Základní jednotka SI</i>	<i>Český název</i>	<i>Anglický název</i>
t	[°C]	Celsiova teplota	Celsius temperatur
P	[%]	procento	percent
f	[Hz]	frekvence	frequency
t	[s]	čas	time
m	[kg]	hmotnost	mass
P	[W]	výkon	performance
F	[N]	síla	force
$\rho$	[ $\Omega$ m]	měrný elektrický odpor	electrical resistivity
UV	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzita ultrafialového záření	intensity of ultraviolet radiation

### Zkratky

<i>Zkratka názvu</i>	<i>Český název</i>	<i>Anglický název</i>
DPS	Deska Plošného Spoje	Printed Circuit Board
BGA	Kuličkové Mřížkové Pole	Ball Grid Array
FC	Otočený Čip	Flip Chip
TAB	Páskové Automatizované Připojení	Tape Automated Bonding
AOI	Automatické Optické Inspekce	Automatic Optical Inspections
MDA	Výrobní Analyzování Poruchy	Manufacturing Defect Analyzing
PGA	Konektorové Mřížkové Pole	Pin Grid Array
C4	Ovládané Připojení Zmenšeného Čipu	Controlled Collapse Chip Connection
SMD	Zařízení pro Povrchovou Montáž	Surface Mounting Device
Ag	Stříbro	Silver
Au	Zlato	Gold
Al	Hliník	Aluminium
Mg	Mangan	Manganese
Si	Křemík	Silicon
Cu	Měď	Copper
Sn	Cín	Tin
Pb	Olovo	Lead

# 1 Propojovací struktury

## 1.1 Úvod do propojovacích struktur

V minulosti patřilo ke chtěným a často využívaným pracovním postupům v elektronice spojování dvou stejných či rozdílných druhů kovových částí. V této části bakalářské práce se zaměříme na možné spojování těchto materiálů, abychom mohli přistoupit k samotné diagnostice vytvořených spojů.

Spojované materiály se za ideálních okolností nemají již nikdy rozpojit. Musí být zaručena pevnost jejich spojení. To nám v minulosti zajišťovalo svařování, které bylo nejrozšířenějším způsobem spojování dvou kovových částí. Z důvodu velké pevnosti sváru, který vzniká při svařování materiálů. Tuto vlastnost, pevnost spoje, jsme dříve nemohli dosáhnout např. pájením a lepením. Pohybovali jsme se totiž u spojování dvou větších kovových součástí. Oproti tomu v dnešní době, kdy je preferována co možná nejmenší velikost spoje, se na poli elektroniky převážně používají technologie pájení, lepení a bondování. Díky jejich vlastnostem, které nám umožňují používat jejich technologie i v těch nejmenších spojích. Svařování zůstalo díky svému nepřizpůsobení dominantní technologií při spojování větších kovových částí, kde je především využíváno díky svým již zmíněným vlastnostem.[1], [2]

## 1.2 Seznámení s problematikou propojovacích struktur

### 1.2.1 Pájení

Při použití technologie pájení dochází k nerozebíratelnému spojení dvou kovových částí. Nerozebíratelné spojení dvou kovů vzniká za pomoci roztavení kovu (pájky) a materiálu spojovaných kovových částí. Pájka má nižší teplotu tavení, než je teplota tavení u spojovaných kovových částí. Vzniklý spoj by měl být co možná nejmenší, nejtenčí a velice odolný vůči nežádoucím vlivům.[2] To nám přináší velkou úsporu nákladů při používání této technologie. Z pohledu minimalizace nákladů je tedy pro výrobu tato technologie velmi žádána. Pájení dovoluje spojovat i rozdílné druhy materiálů, to je další výhoda této technologie. Druhou výhodou, ale i nevýhodou současně je, že při pájení jsou používány menší teploty než při svařování.[1], [2], [3]

**Výhody pájení, [3]:**

- spojování různých materiálů,
- voděodolnost,
- jednoduchost,
- elektricky a tepelně vodivé,
- nízká cena,
- nižší teploty pájení.

**Nevýhody pájení, [3]:**

- nečistoty,
- menší odolnost spoje, nižší teplota pájení,
- vznik koroze,
- nutné dohlížení na provedení spoje, tolerance spáry.

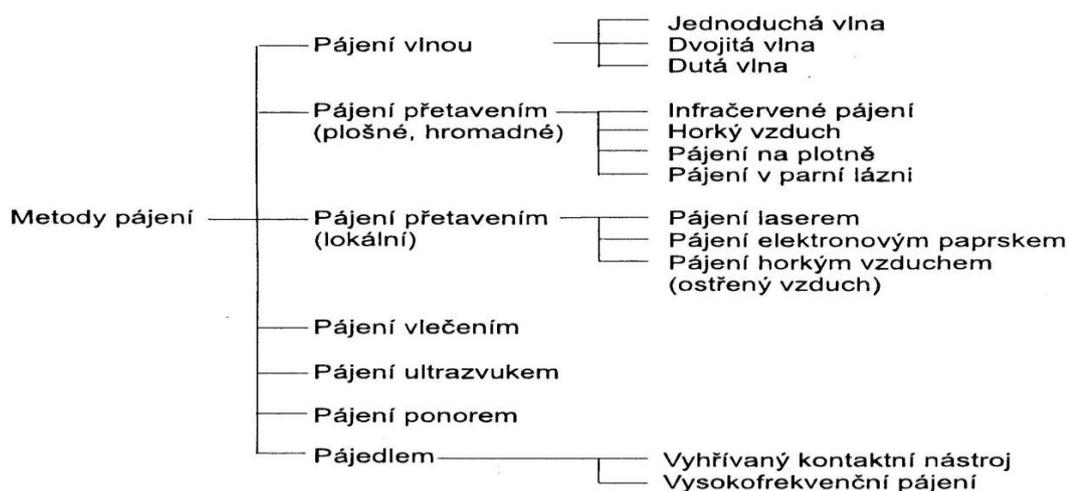
**Hlavní části, s kterými se setkáme u pájení, [9]:**

- pájedlo, nástroj umožňující nám pájet, dle pájeného místa si volíme výkon pájedla,
- pájka, materiál tvořený ze slitiny kovů, volíme vždy nejvhodnější typ pájky,
- tavidlo, používáno pro odstranění nečistot (mastnot) a oxidů z místa, které má být pájeno, musíme volit vhodné tavidlo.

Prvotní, hlavní rozdělení pájení je dle teploty, při níž se má pájka roztavit. V tomto případě mluvíme o tzv. měkkém pájení a tvrdém pájení.[1], [2], [5]

**Měkké pájení**

Měkké pájení se pohybuje do 450 °C. V měkkém pájení se používají pájky s nízkou teplotou tavení, jako je např. cín, olovo a jejich slitiny. Pájky se taví při teplotách zhruba od 160 °C do 380 °C.[3] Tavení pájky je zajišťováno pájedlem, nejvíce využívaná je měď. Měď velmi dobře přenáší teplo. Pomocí účinné části pájedla, hrany, plochy, které přivádí teplo, jsou tvořeny tak, aby je bylo možné přikládat na potřebná místa, kde má pájka působit a spojit dané materiály. Měď je také využívána jako pájedlo z důvodu, že i po několikanásobném ohřívání se na ní objevuje malé množství nečistot a okují.[5], [6], [7]



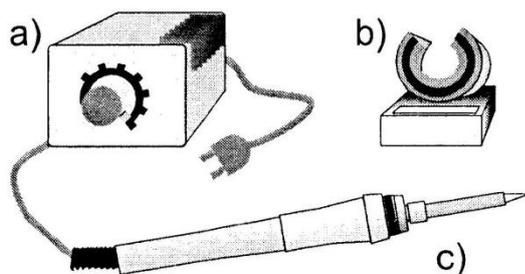
Obr. 1 Pájecí techniky měkkého pájení používané v elektrotechnice (zdroj: [14])

### Tvrdé pájení

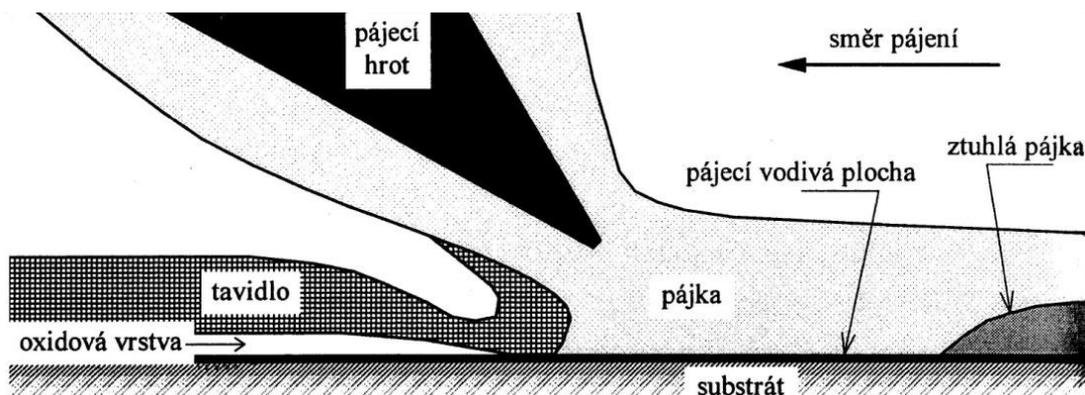
V tvrdém pájení se používají pájky s vyšší teplotou tavení než 450 °C, např. měď, hliník, mosaz, stříbro, zlato, platina. Zpravidla se pohybujeme v rozmezí od 650 °C do 1000 °C. Pro tyto pájky se využívá nahřívaných pájedel nebo žíhaného plamene pájecích lamp. U tvrdého pájení se více využívá pájení za pomoci plamene. Ten můžeme korigovat přiblížením, oddálením od místa pájeného spoje. Tvrdý spoj nám poskytuje pevnější spoj, těsnost a odolnost proti korozi. Oproti měkkému pájení, je zde zapotřebí větší pájecí teploty a složitějších zařízení pro pájení.[2], [3], [4]

### Druhotné rozdělení pájení, dle způsobu pájení, [1], [11]:

- **Ruční pájení** je nejvyužívanější způsob pro výměnu, opravu součástek na DPS. U ručního pájení je nanášeno tavidlo na spoj a spoj je následně ohříván hrotem ruční páječky. Tavidlo je nanášeno ještě před ohřevem. Pokud páječka neumožňuje uvolnění tavidla během pájení.



Obr. 2 Ukázka klasického typu ručního pájedla; a) napájecí zdroj; b) stojánek na pájedlo; c) pájedlo - pájecí hrot s rukojetí (zdroj: [19])

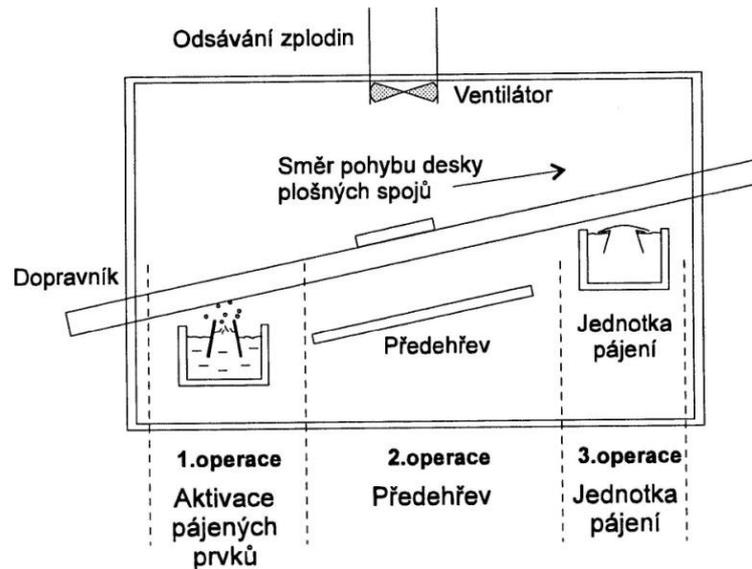


Obr. 3 Detailní pohled na hrot pájedla v průběhu ručního pájení (zdroj: [18])

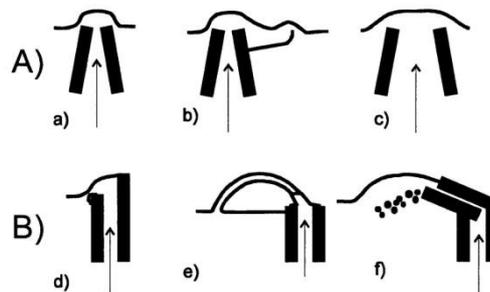
- **Pájení vlnou** je strojní automatizované pájení. Pájení vlnou zaujímá převážné postavení ve strojním pájení. V případě pájení vlnou je ohřev spoje a dodání pájky spojen v jeden krok. Před tímto krokem, je deska plošných spojů předeřhřáta na teplotu okolo 100 °C, aby nebyla podrobena velkému teplotnímu šoku. Součástí je také nanesení tavidla ještě před samotnou pájecí vlnou. Poslední operace je vlastní pájení vlnou, kde dojde ke spojení dvou kovů (součástky a vodivého spoje DPS) pájecí slitinou. Názorná ukázka postupných operací pro pájení vlnou je na Obr. 4.[14] Pájecí vlna může mít nepřeborné množství tvarů viz Obr. 5, dle potřeby. Různé druhy pájecích vln mají určité teplotní profily, ukázka dvou teplotních profilů je na Obr. 6.

Tab. 1 Podílové rozdělení strojních pájecích technik používaných v praxi (zdroj: [14])

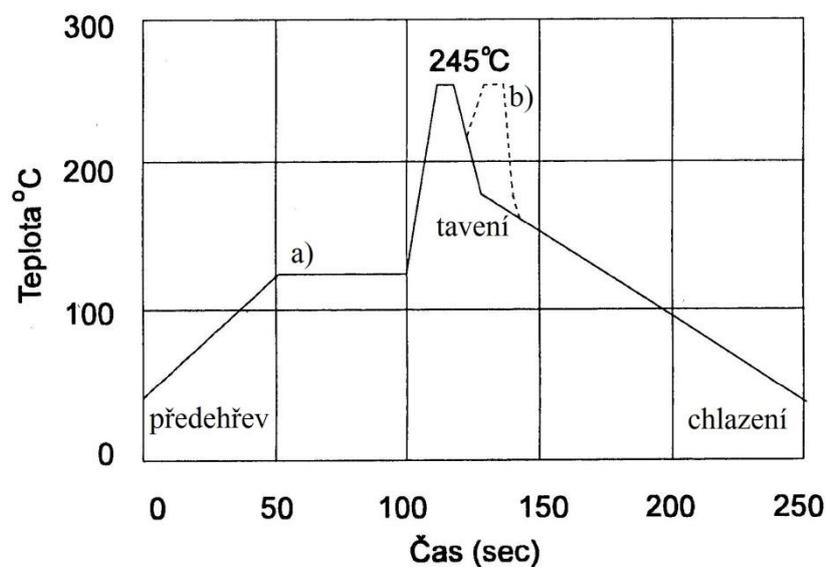
Způsob pájení	Využití [%]
Pájení vlnou	44
Infračervené pájení	30
Pájení v parách	15
Pájení laserem	5
Ostatní metody	6



Obr. 4 Postupné operace strojního pájení u pájecího zařízení (pájení vlnou) (zdroj: [14])

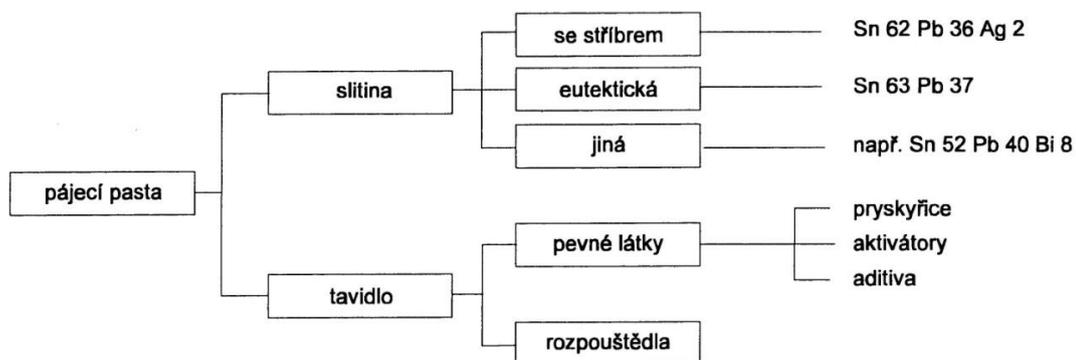


Obr. 5 Různé tvary pájecích vln; A) oboustranné vlny; B) reflexní vlny; a, c) jednoduchá; b) dvojitá – s jednou tryskou; d) delta; e) dutá; f) turbulentní (zdroj: [14])

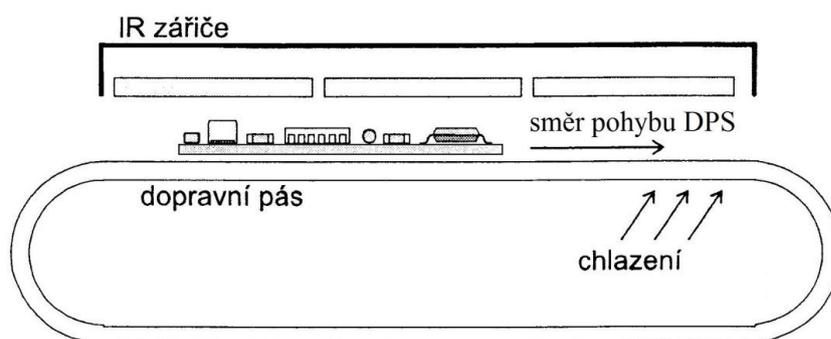


Obr. 6 Pájení vlnou - teplotní profil; a) jednoduchá vlna; b) dvojitá vlna (zdroj: [14])

- **Pájení přetavením** je další způsob pájení. Při tomto způsobu pájení se na povrch pájeného předmětu nanese určené množství pájecí pasty (pájecí pasta je složena z kuliček pájecí slitiny a tavidla) na pájené místo. Následně poté se působí tepelnou energií, kdy dochází k přetavení pájecí slitiny. Po dosažení požadované teploty a přiložení pájených míst k sobě vznikne spoj.[19] Nanesení pájecí pasty a ohřev pájeného spoje mohou být od sebe odděleny prostorově i časově. Při procesu přetavení je úkolem pájecího zařízení pouze dodat potřebné množství tepelné energie k prohřátí spoje. V dnešní době je u pájení přetavením nejvíce využíváno infračervené pájení a to 30 % z celkového způsobu pájení (viz Tab. 1), schéma infračerveného pájení je vidět na Obr. 8.



Obr. 7 Schéma složení pájecí pasty (pájecí pasta je tvořena z: 90 % kovových složek - slitin + 10 % tavidla) (zdroj: [19])



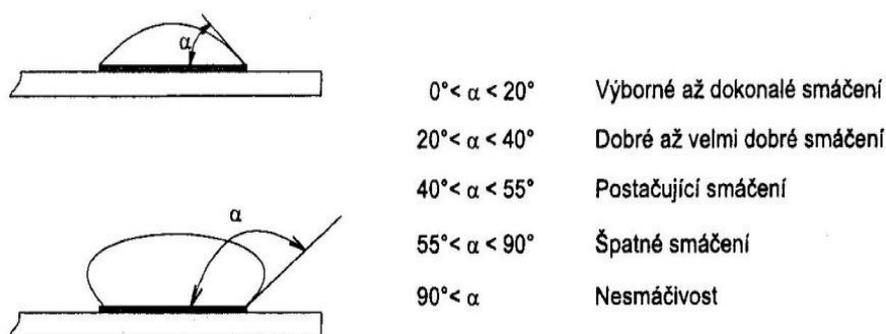
Obr. 8 Pájení přetavením na principu infračerveného záření (zdroj: [19])

Tato část bakalářské práce je především zaměřena na důležité vlastnosti pájení, které nám ovlivňují kvalitu pájeného spoje. Pro kvalitní pájení je zapotřebí i dalších vlastností, které se u pájení vyskytují, např. tavidla, smáčivost, vzlínavost, difúze pájení. Pokud vyhovíme všem kritériím pro kvalitní pájení, vznikne nám kvalitní spoj ve všech ohledech.

## Důležité vlastnosti pro tvorbu pájeného spoje

### Smáčivost

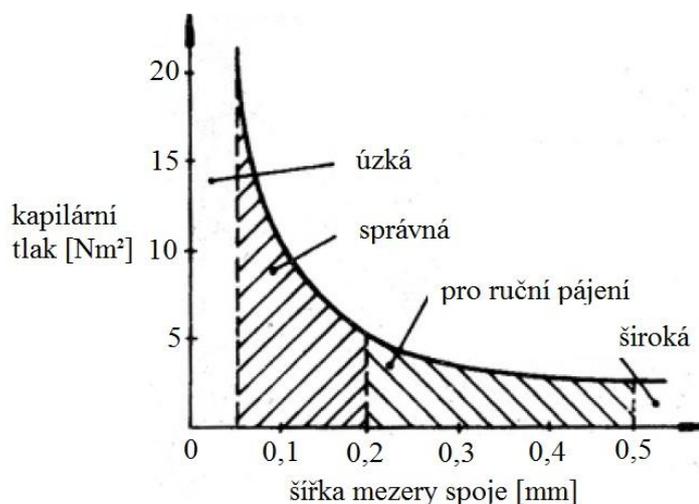
Smáčivost představuje u pájení schopnost pájky přilnout k základnímu materiálu. U této schopnosti je důležitý především kontaktní úhel. Úhel je dán tečnou k povrchu pájky v místě, kde dochází ke styku se základním materiálem. V případě dokonalé, ideální smáčivosti by měl být svíraný úhel do  $20^\circ$ . [5], [6]



Obr. 9 Kontaktní úhel pro určení smáčivosti (zdroj: [19])

### Vzlínavost

Vzlínavost nebo také kapilární jev je závislost šířky mezery spoje na vyplnění mezery pájkou. Šířka mezery by měla být pokud možno co nejmenší. Tím se nám zaručí vyšší tlak, pevnost spoje v dané šířce mezery. Správná šířka mezery pro spoj by měla být od 0,05 mm do 0,2 mm. To nám zaručí zaplnění šířky mezery pájkou. [5], [6]



Obr. 10 Šířka mezery spoje (zdroj: [5])

## Tavidlo

Tavidla nám poskytují možnost odstranit z pájeného spoje nečistoty (mastnoty) a oxidační vrstvy, to nám zaručí správnou smáčivost pájeného povrchu. Tavidlo nám také pomáhá chránit pájku a pájený spoj před další oxidací. Tavidlo nám napomáhá i v roztékavosti pájky, proto by mělo mít příslušnou viskozitu, tečení. Ovlivňuje i povrchové napětí pájky a tím i zatékání pájky. Tavidlo musíme volit s ohledem na spolehlivost a stálost vlastností zapájených dílů elektrotechnických zařízení. Hodnotíme je dle tvorby pájeného spoje, ale také i z hlediska ohrožení další, budoucí funkce elektronického zařízení. Zbytky tavidel mohou být korozivně aktivního a elektricky vodivého charakteru. Ovšem tyto reakční charaktery tavidel jsou nežádoucí, proto v těchto případech musíme zbytky tavidel odstranit z místa pájeného spoje. [1], [2], [5], [6] Obecný přehled tavidel používaných pro pájení v elektronice je znázorněn v Tab. 2.

### Kalafunová tavidla se označují dle množství aktivátoru, [1]:

- R - (Rosin) neaktivovaná kalafuna,
- RMA - (Rosin Mildly Activeted) středně aktivovaná kalafuna,
- RA - (Rosin Activeted) silně aktivovaná kalafuna.

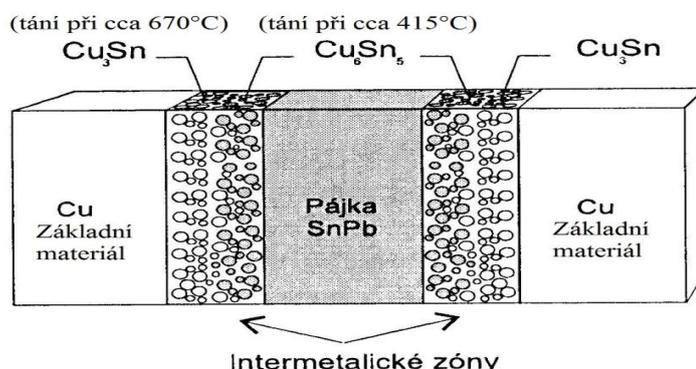
Tab. 2 Přehled používaných tavidel (zdroj: [1])

Typ tavidla	Základ tavidla	Aktivátor	Forma
pryskyřičná	kalafuna	bez aktivátoru halogenový aktivátor	roztok pevná látka pasta
	umělá pryskyřice		
organická	vodou rozpustná	nehalogenový aktivátor	
	vodou nerozpustná		
anorganická	soli	s chloridem amonným	
		bez chloridu amonného	
	kyseliny	kyselina fosforečná	
		jiná kyselina	
zásady	aminy nebo čpavek		

## Difúze

Difúze pájky je samovolný jev, při kterém dochází k smíchání molekul z oblasti pájky s molekulami z oblasti základního materiálu (intermetalické vrstvy). Difúze pájky je vyvolána

teplotou pájedla. To nám vytváří slitinu obou kovů. Je-li tedy spoj dostatečně tenký, je spojení obou základních materiálů zajišťováno vytvořenou slitinou a nikoliv pájkou. [5], [6]



Obr. 11 Vznik intermetalických vrstev v pájce SnPb (zdroj: [19])

Žádnou ze zde zmíněných rozhodujících vlastností nelze zanedbat nebo opomenout při tvorbě jakéhokoliv pájeného spoje. Je důležité dodržovat určitá pravidla, jinak řečeno postup, který je důležitý při tvorbě pájeného spoje. Zmíněný postup pro tvorbu pájeného spoje je uveden níže.

#### Možný postup pro tvorbu pájeného spoje, [4]:

- 1) Základní materiál uvedeme do vhodné vzájemné pozice a upevníme.
- 2) Naneseme vhodné tavidlo a zahřátím je aktivujeme.
- 3) Fixovaný spoj zahřejeme na požadovanou pracovní teplotu.
- 4) Přivedeme pájku do spoje.
- 5) Spájený spoj ochladíme.
- 6) Odstraníme zbytky nežádoucích tavidel, očistíme spájený spoj.

### 1.2.2 Lepení

V oblasti elektroniky nabývá čím dál více na významu technologie spojování součástek pomocí lepidel. Významným důvodem je fakt, že v dnešní době dochází k co možná největší miniaturizaci součástek, montážních skupin a celých finálních produktů. K tomuto trendu nám výborně slouží lepidla, která nám pomáhají k realizaci těchto finálních výrobků. Jedná se totiž o levnou, spolehlivou, rychlou a bezpečnou technologii. Lepidla nám také pomáhají k ochraně modulů, které se v případě potřeby zalévají, jsou chráněny proti mechanickému namáhání a

také, proti oxidačním účinkům prostředí.[1], [10], [11] V elektronice u technologie lepení dochází k propojení součástky, případně integrovaného čipu a DPS za pomoci lepidel.[10]

**Výhody lepení, [25]:**

- nižší teplota vytvrzování (100 – 150 °C),
- ekologické vlastnosti, nehořlavost, netoxičita, bez zápachu, bezrozpuštědlovost,
- přilnavost k většině kovových a nekovových materiálů,
- možnost měnit mechanické a elektrické vlastnosti lepeného spoje.

**Nevýhody lepení, [25]:**

- delší doba vytvrzování,
- nižší stabilita lepeného spoje,
- nižší odolnost proti navlhání,
- nižší spolehlivost,
- náročnější opravy,
- vyšší cena.

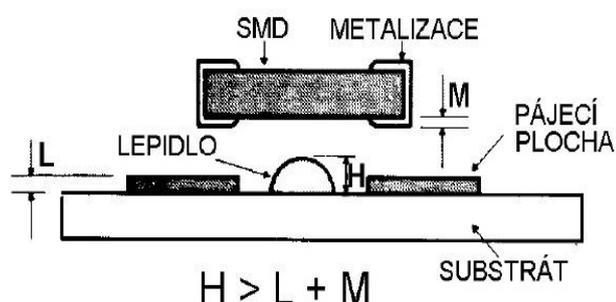
**Důležité vlastnosti pro vznik lepeného spoje****Složení lepidla**

Složení lepidel je dáno dvěma základními složkami, vazební a vodivou. První a nejdůležitější je složka vazební, která zaručuje vytvoření izolační matrice, kde budou následně rozmístěny vodivé částice. Vazební složka (polymerní složka) nám vytvoří matici, která bude mít mechanické vlastnosti spoje, např. pevnost, adhezi, houževnatost a teplotní odolnost. Vazební část může být jednosložková i dvousložková. Nejčastěji využívána je epoxidová pryskyřice, ale také polyimidové, silikonové, akrylátové, polyamidové a polyuretanové pryskyřice. Vodivá složka (plnivo) nám zaručí elektrické vlastnosti spoje, např. elektrickou vodivost. Nejvíce využívané plnivo je stříbro, dále pak měď, nikl, zlato. Vodivá složka je nejčastěji tvořena v obrazcích kuliček nebo lupínků.[1], [12], [14]

**Nanášení lepidla**

Lepidla jsou nanášena na DPS pomocí šablonového tisku, sítotisku, dispenzeru nebo kapkovou metodou (pin transfer). Dnes se převážně používá způsob pro nanášení lepidla na

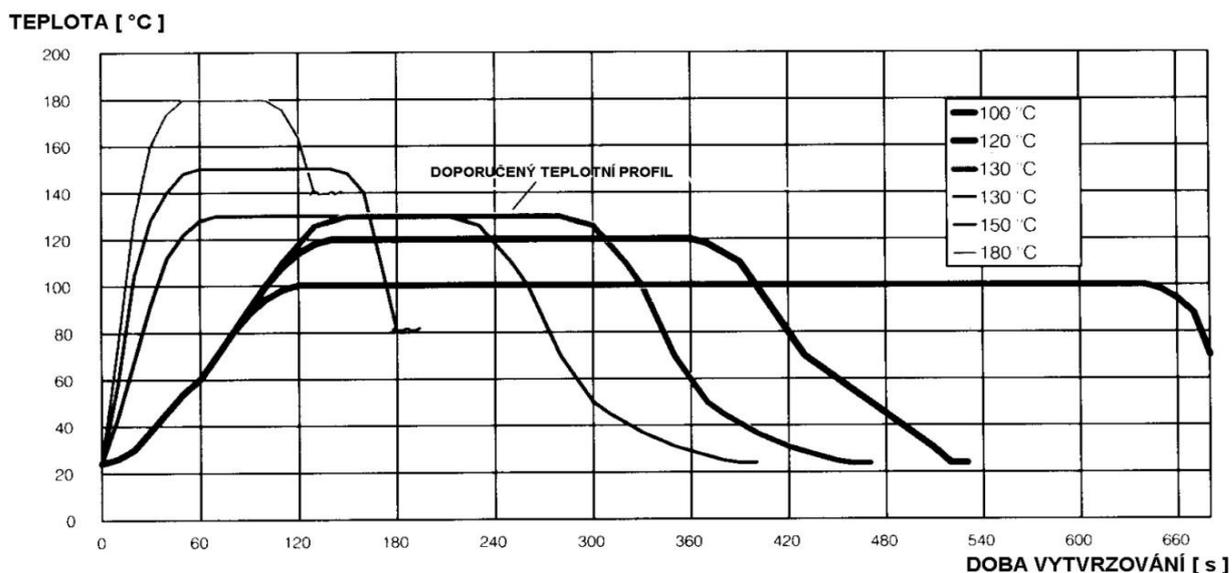
požadované místo pomocí dispenzeru. Tento způsob je založen na principu tlak / čas. Hlavními parametry u dávkování jsou např. tlak, čas dispenze, vzdálenost jehly od DPS, průměr jehly, teplota lepidla, prodleva. Je nutné nastavit správný proces dávkování s ohledem na vlastnosti určitého lepidla. Množství lepidla, které je nanášeno, musí být přiměřené. Při dodání a přitlačení součástky na DPS nesmí dojít k zničení pájecích plošek případným vytlačeným lepidlem. Zároveň musí být dodržena dostatečně velká styková plocha se součástkou a DPS. Na Obr. 12 můžeme vidět způsob nanášení nevodivého lepidla, kde  $H$  je výška kapky,  $L$  je výška pájecí plochy a  $M$  je výška stykové plochy součástky.[12] Optimální případ nastane, pokud se součet obou pájecích ploch ( $M + L$ ) blíží výšce kapky  $H$ . [18]



Obr. 12 Nanášení lepidla s požadovanou výškou kapky (zdroj: [12])

### Vytvrzování lepidla

Lepidla je zapotřebí vytvrzovat. Vytvrzování lepidel je prováděno několika způsoby. Především je využíváno vytvrzování lepidel za zvýšené teploty. Teploty se pohybují v rozmezích 100 až 150 °C. Vytvrzovací doba je v těchto případech 30 minut až 2 hodiny, dle druhu lepidla. Lepidla je také možné vytvrzovat za normálních pokojových teplot, zde je ovšem doba vytvrzování mnohem delší, někdy i stovky hodin. Je možné využít i intenzitu UV záření, kde se intenzita UV záření pohybuje okolo 100 mW/cm<sup>2</sup> po dobu 10 - 45 sekund. Je také možné zde zmíněné způsoby vytvrzování lepidel kombinovat. U vytvrzování lepidel se využívá především nižších teplot, než je tomu např. u pájení, bondování, tím se méně namáhá DPS, která se tak chrání.[1], [12], [14]



Obr. 13 Vytvrzování lepidla – teplotní profil (zdroj: [12])

V elektronice se dnes preferují lepidla, která jsou rozdělena na dvě hlavní části, a to s ohledem na jejich využití ve výrobě.[10], [11]

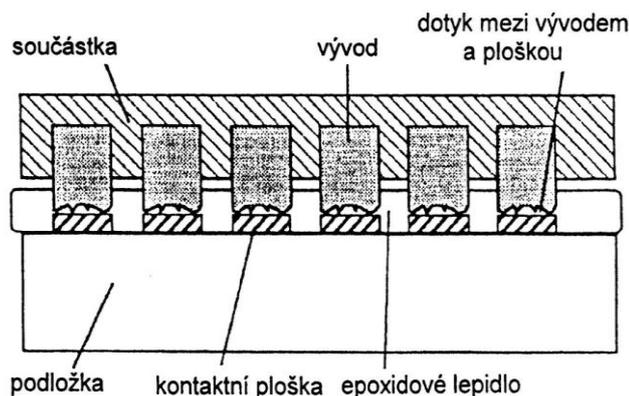
### Rozdělení lepidel:

- nevodivá,
- vodivá.

### Nevodivá lepidla

Nevodivá lepidla se převážně používají k přichycení součástek na desku plošného spoje (DPS). Jedná se především o složení lepidel na bázi epoxidových pryskyřic. Nevodivé lepidlo je jednosložkové a neobsahuje tedy vodivou složku (plnivo). U epoxidových pryskyřic je využita jejich přednostní vlastnost. Tou je výskyt vnitřních pnutí. Pokud jsou k sobě přiloženy dva kovové povrchy na dotek a následně jsou zality lepidlem, které je vytvrzeno, zůstává následný elektrický spoj po dlouhou dobu bez jakýchkoliv změn. Vnitřní pnutí pryskyřice poskytuje dostatečnou přitlačnou sílu. Kontaktní odpor bývá stálý a nízký zároveň. Tento princip je využíván metodou pro připojování integrovaných obvodů na DPS.[11], [12], [13]

Pokud bude lepidlo nanášeno i mimo chtěné lepené místo a poté bude vytvrzeno, nic závažného se nestane, protože lepidlo neobsahuje vodivé částičky. Nemůže tedy dojít ke zkratu na DPS.[1], [11]



Obr. 14 Připojení pomocí nevodivého lepidla (zdroj: [11])

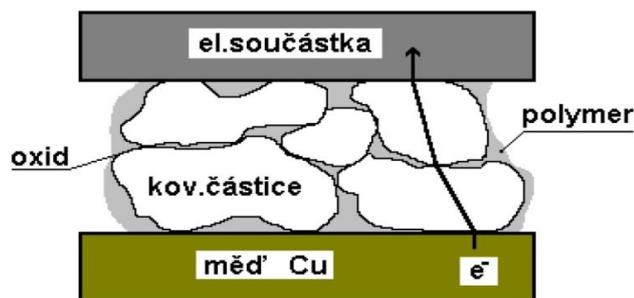
### Vodivá lepidla

Vodivá lepidla můžeme ještě dále dělit dle jejich kontaktu mezi vodivými částicemi (plnivem). Po rozdělení se jedná o vodivá lepidla izotropní a anizotropní.[1] Důležitá vlastnost vodivého lepidla je pevnost v tahu a smyku. Při nanášení lepidla chceme docílit, aby v nanášeném místě lepidla nebylo prázdné místo, aby nevznikaly vzduchové mezery (bublíny). Vzduchovým mezerám se zabraňuje již při přípravě lepidla dostatečným promícháním jednotlivých složek lepidla. Vzduchové mezery nám zhoršují vodivost a pevnost lepeného spoje.[12] V případě nanášení vodivého lepidla sítotiskem nebo tiskem přes šablonu se tloušťka nanášené vrstvy pohybuje od 35 až do 150  $\mu\text{m}$ . [12], [13]

### Izotropní lepidla

Stejně jako nevodivá lepidla jsou izotropní lepidla tvořena vazební složkou z epoxidových, polyimidových a akrylátových pryskyřic. Ovšem s tím rozdílem, že jsou doplněna vodivým kovem (plnivem). Plnivo zaručuje vodivost lepidla mezi DPS a součástkou. V případě izotropických lepidel ideálně ve všech směrech. Plnivo je nejčastěji ve formě kuliček, ale také lze použít lupínky nebo prášek. Průměr plniva bývá v mikrometrech ( $\mu\text{m}$ ). Nejčastěji užívaným plnivem je stříbro (Ag). Jeho zastoupení bývá 20 % objemových nebo zhruba 85 % váhových. Z pohledu na objemovou rezistivitu jsou lepidla po vytvrzení v rozsahu okolo 1 až 10  $\mu\Omega\text{m}$  (u SnPb pájky je to pro srovnání asi 0,17  $\mu\Omega\text{m}$ ). [1], [11], [12], [14]

U izotropních lepidel se snažíme dbát na jejich řádné nanášení. Izotropní lepidlo musí být nanášeno pouze na dané místo, kde bude tvořit vodivé spojení. Pokud je nanášeno lepidlo mimo kontaktní spoj a bude zasahovat do některé z vodivých cest na DPS, může dojít ke zkratu. [12], [13]

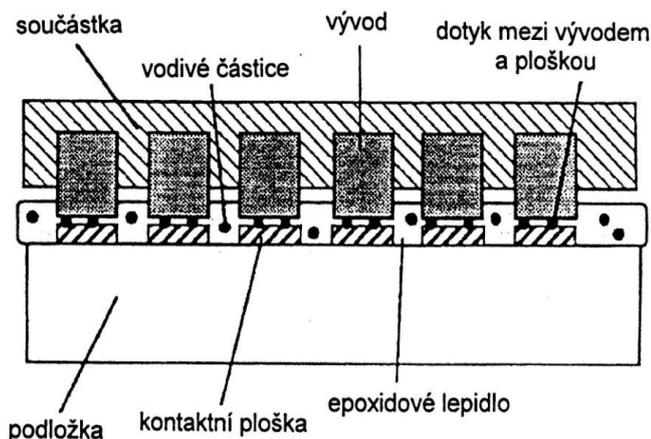


Obr. 15 Princip spojení částic plniva v izotropním lepidle (zdroj: [12])

### Anizotropní lepidla

Také označována jako Z – axis lepidla jsou vyráběna ve formách past a anizotropních filmů. Jejich předností je schopnost elektrického spojení pouze v jednom směru, tzv. pouze ve směru osy „z“ (jednoduše řečeno: „vodivé spoje ploch proti sobě“).[13]

Spojení je prováděno dotykem lepených ploch a polymeru s plnivem, jako tomu bylo u předchozích izotropních lepidel. S tím rozdílem, že anizotropní lepidla obsahují menší množství kovových částic. Velikost těchto vodivých částic je zhruba 100  $\mu\text{m}$ , tvaru nejčastěji lupínků, ale i jiných tvarů. Anizotropní lepidla se vyznačují vlastností, že jsou vodivá ve směru kolmém na rovinu DPS. Nevodivá jsou naopak ve směru rovnoběžném s DPS. Pokud použijeme v anizotropním lepidle lupínky jako plnivo, jsou tyto lupínky při nanesení na DPS rovnoběžné s DPS. Při vytvrzení vazební složky (polymeru) dochází k jejímu smrštění, tím dojde také k příčnému propojení lupínků, naopak je tomu u podélného propojení lupínků, s ohledem na jejich značnou rozdílnost ve velikosti, je to nepravděpodobné, spíše náhodné.[1], [11], [12]

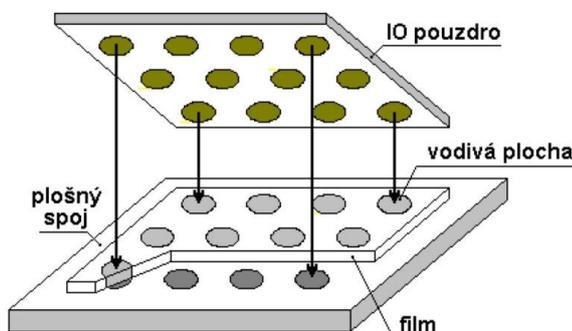


Obr. 16 Princip propojení pomocí anizotropního lepidla (zdroj: [11])

## Anizotropní film

Anizotropní film je „páska“, která je vkládána mezi kontaktované plošky, dosahováno je především lepších elektrických vlastností spoje. Anizotropní film je folie tenkých rozměrů, která obsahuje krycí vrstvu na povrchu. Důležité je, aby součástka, která má být spojena s DPS měla vývody ve tvaru výstupků. Plocha výstupků by měla být rovna na čele plochy, aby byl dosažen kvalitní „přilnavý“ spoj. Mezi tyto plošky DPS a součástky se vloží anizotropní fólie s vodivým lepidlem. Následuje přitlačení a vytvrzení lepidla, tím dojde k propojení vývodů součástky a připojovacích ploch na DPS.[1], [12]

Vodivá složka (plnivo) ve vrstvě polymeru je náhodně rozmístěna po fólii nebo je umístěna na předem vymezených a definovaných místech (nejčastěji v průměru kolem 1,5 mm), dle rastru nanášení. Pokud je plnivo na předem definovaných místech, vznikají tzv. orientované vodivé vrstvy. Takto rozvržená fólie s orientovanými vodivými vrstvami nám zvýší spolehlivost spoje a především zlepší elektrické izolační vlastnosti. Vodivé částice nejsou totiž obsaženy na celé ploše, ale pouze v předem nadefinovaných místech, kde má dojít k vodivému spojení. Anizotropní film se úspěšně používá např. u pouzder BGA.[1], [12]

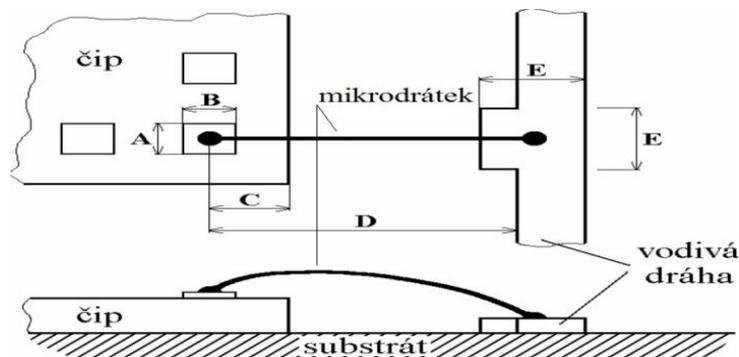


Obr. 17 Ukázka nanášení anizotropního filmu (zdroj: [12])

### 1.2.3 Bondování

V dnešní době je požadováno, aby součástka plnila více operací naráz. Proto vznikají čipy integrovaných obvodů. Čipy integrovaných obvodů jsou zapouzdřeny. Zapouzdření je velmi náročná technologie, důvodem je velmi vysoká citlivost čipů na mechanické, elektrické, fyzikální a chemické vlivy. Tyto podmínky u pouzdření musí být vždy dodrženy. Společně i s podmínkami, které vznikají při technologii připojování zapouzdřeného čipu na základnu. Obě technologie společně velmi ovlivňují čip.[1], [14]

V případě připojování čipu pomocí mikrodrátku (tzv. wire bonding) dochází k propojení mezi mikrodrátkem a kontaktní ploškou na čipu nebo vývodu pouzdra. Jedná se o nejstarší techniku pro připojování čipů k vývodům pouzder.[15], [16], [17]



Obr. 18 Připojení čipu pomocí mikrodrátku (zdroj: [17])

**Výhody bondování, [1]:**

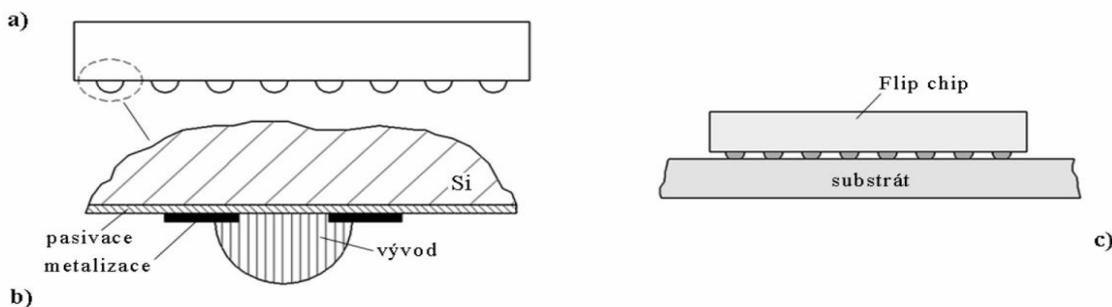
- velká hustota vývodů na malé plošce (malé rozměry),
- rychlý rozvoj technologie.

**Nevýhody bondování, [1]:**

- vyšší cena v případě opravy,
- vysoká možnost vzniku chyby při kontaktování.

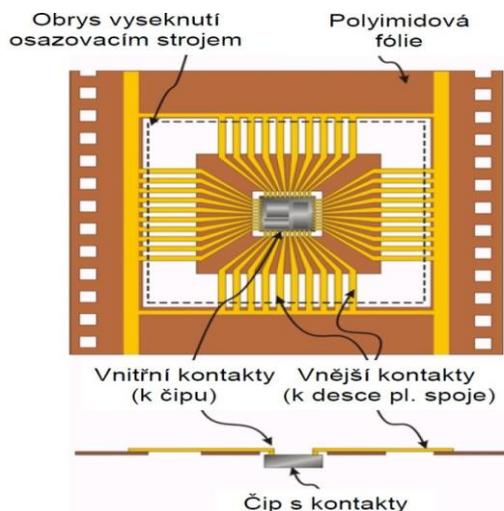
**Další možné způsoby pro připojení čipu jsou, [1]:**

- způsobem „FC“ **Flip Chip** (otočený čip), jedná se o montáž čipu v převrácené poloze. Montáž je proveditelná buď lepením, termokompresí nebo pájecí technikou C4 (controlled collapse chip connection).



Obr. 19 Princip připojení Flip-Chipu; a) součástka Flip-Chipu; b) detail vývodu součástky; c) připojení Flip-Chipu k připravenému substrátu (zdroj: [17])

- způsobem „TAB“ **Tape Automated Bonding** (páskové automatizované připojení), jedná se o připojení čipu na ohebný plošný spoj. Snadně řečeno, jde o připojování čipu pájením na ohebný materiál.



Obr. 20 Princip pro připojení TAB (zdroj: [16])

V této části bakalářské práce se budeme zabývat pouze technologií připojování mikrodrátky (wire bonding).

## Důležité vlastnosti u připojování mikrodrátky

### Teplota připojování

Zhruba do roku 1970 byla teplota, kterou musely čipy snášet okolo 200 - 350 °C. Jako podložka byla použita keramika. Ovšem takto vysoká teplota měla za následek to, že vznikaly některé nežádoucí slitiny. Slitiny byly křehké a vytvářely příčinu poruch a chyb při teplotním cyklování součástek. Připojování bylo prováděno především ručně zpravidla za pomoci zlatého (Au) drátu a hliníkové (Al) připojovací plochy.[1] Dnes se dává především přednost polyamidovým materiálům oproti keramickým. Připojování mikrodrátky je možné použít při teplotách 150 – 200 °C. Při této teplotě se zabráňuje vzniku křehkých slitin, které vytváří poruchy a chyby ve vzniklém spoji. Při použití nižších teplot se rapidně zvyšuje spolehlivost spojů.[1], [14], [17]

## Spojový materiál

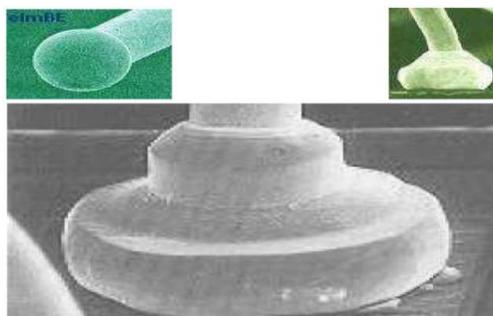
Ke kontaktování čipu a DPS je využíván mikrodrátek. Mikrodrátky jsou z materiálů, které nám dobře a snadno dovolují vytažení drátu o velmi malém průměru. Průměr mikrodrátku je dnes využívám menší než 50  $\mu\text{m}$ . Materiál pro mikrodrátky by se měl také dobře svařovat. Nejběžnějším materiálem používaným pro připojování mikrodrátky je hliník (Al) s 1% křemíku (Si) (nebo-li AlSi 1%). Si byl přidán z důvodu lepších vlastností při tažení Al. Navíc se při kontaktování Si čipu nedostává do spoje další prvek. Dalšími prvky jsou např. Al s 0,5 – 1% Mg (AlMg 1%), Mg je přidáván do Al ze stejných důvodů jako Si. Mg má lepší mechanické vlastnosti při vyšších teplotách a má nižší měrný odpor oproti Si. Nebyl prokázán žádný negativní vliv Mg na Si čipy. Také zlato (Au) je využíváno k propojování čipů s DPS velice často. U zlata (Au) se jedná o vyšší pořizovací ceny. Může se tedy nahradit samotnými čistými materiály jako je hliník (Al) a měď (Cu).[1], [15], [17]

## Připojovací nástroj

Připojovací nástroj se dělí podle tvarového způsobu zakončení mikrodrátku viz Obr. 21, 22.

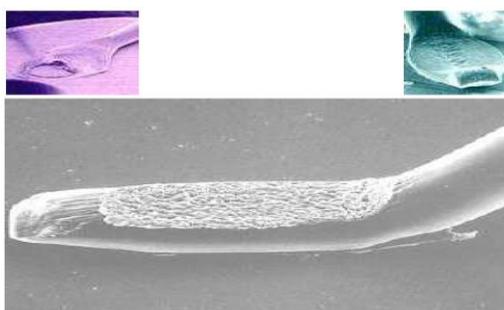
Jsou využívány dva způsoby připojování, [1]:

- **připojování, kontaktování na kuličku** – Na konci drátku v kontaktovací hlavě je vytvořena pomocí elektrického výboje kulička, kulička je poté pomocí kontaktovací hlavy přivařena na kontaktovací plošku. Kontaktování na kuličku je využíváno u 93 % pouzder. Postupné potřebné kroky technologie připojení na kuličku jsou uvedeny v Příloze 1.



Obr. 21 Ukázka vytvořených kontaktů „na kuličku“ (zdroj: [16])

- **připojování, kontaktování hranou** – Drátek procházející kontaktovací hlavou, pomocí kontaktovacího klínu se přitlačí drátek na čip a skřípec následně povolí, kontaktovací hlava přejeđe nad kontaktovací plošku, kde kontaktovací klín opět dosedne. Kontaktování hranou (klínem) je využíváno u 5 % pouzder. Postupné potřebné kroky technologie připojování hranou jsou uvedeny v Příloze 2.



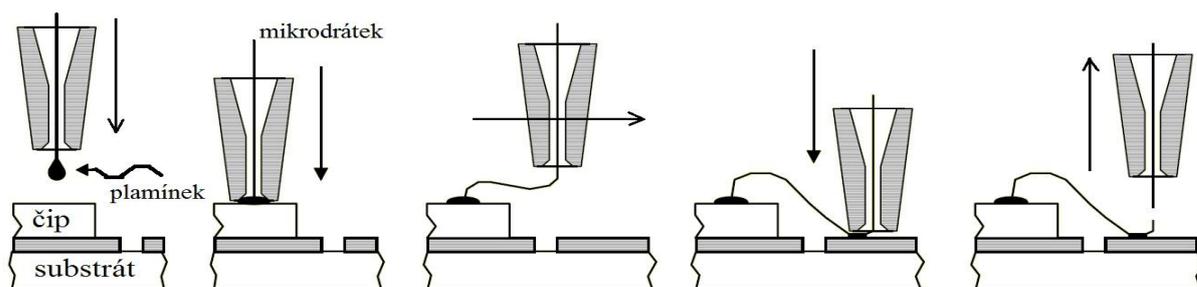
Obr. 22 Ukázka vytvořených kontaktů „hranou“ (zdroj: [16])

**Mikrodrátky jsou připojovány třemi základními technologiemi, [1], [18]:**

- termokompresí (využíváno Au mikrodrátků),
- ultrazvukovým svářením (využíváno AlSi a AlMg mikrodrátků),
- termosonickým svářením (využíváno Au a Cu mikrodrátků).

### Termokompresse

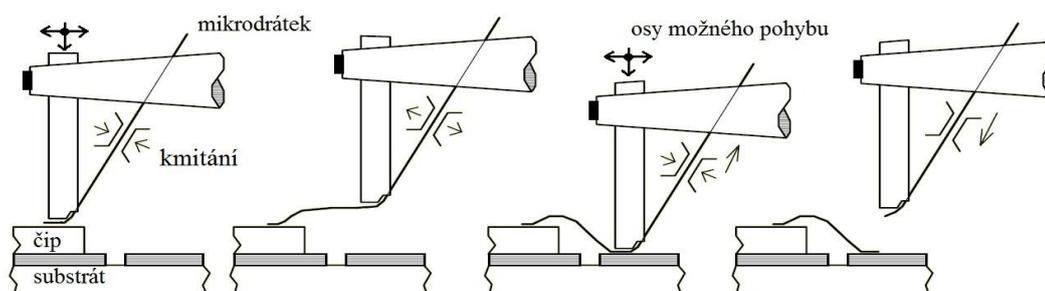
Při termokompresi dochází k vytvoření spoje mezi mikrodrátkem a kontaktovací ploškou. Spoj (svar) vzniká vzájemnou difuzí krystalových mřížek mikrodrátku a kontaktní plošky. Teplota ohřevu kontaktovací plošky i mikrodrátku, který se ohřívá od ní, je nižší než teplota tavení. Teplota bývá 200 – 250 °C. Zbylá energie, která je zapotřebí k vytvoření svaru, je dodávána v podobě tlaku. Doba potřebná k vytvoření svaru je okolo 1 s. Celková teplota, které chceme dosáhnout při termokompresi je okolo 250 – 380 °C.[1], [15], [16]



Obr. 23 Postup při kontaktování pomocí termokompresse (zdroj: [17])

### Ultrazvukové kontaktování

Ultrazvukové sváření je založeno na smykovém prolínání atomů. Propojení je prováděno za pokojové teploty, kontaktní ploška není ohřívána žádným zdrojem tepla. Kontaktní hlava se rozkmitá ve vodorovné poloze, přiloží mikrodrátek na kontaktní plošku a následná přítlačná síla společně s kmity převede materiál mikrodrátku a kontaktní plošky do plastického stavu. V oblasti spoje dojde ke vzájemné difundaci krystalových mřížek materiálů. Kmitočet, kterým kmitá kontaktní hlava, bývá v rozmezí 30 kHz – 120 kHz. Doba, za kterou je spoj zhotoven, se pohybuje okolo 25 ms. Doba připojení je tedy přibližně 50x rychlejší než u termokomprese. Kontaktní hlava bývá většinou piezoelektrický měnič. Zatím však neexistuje přesný matematický model, který by dokázal tento mechanismus popsat s dostatečnou přesností.[1], [15], [17]



Obr. 24 Postup při kontaktování pomocí ultrazvuku (zdroj: [17])

### Termosonické kontaktování

Termosonické sváření je založeno na kombinaci termokomprese a ultrazvukového kontaktování. V tomto případě je kontaktní ploška ohřívána jako je tomu u termokomprese, aby docházelo k vzájemné difuzi, připojovaný drátek je současně rozkmitán kontaktní hlavou, jako je tomu u ultrazvukového kontaktování. Teplota potřebná k vytvoření svaru je okolo 150 – 200 °C. Doba potřebná k vytvoření připojovacího spoje je v rozmezí 5 – 20 ms, ovšem zde je podmínka, působící hmotnost na spoj musí být zhruba okolo 100 g.[1], [16], [17]

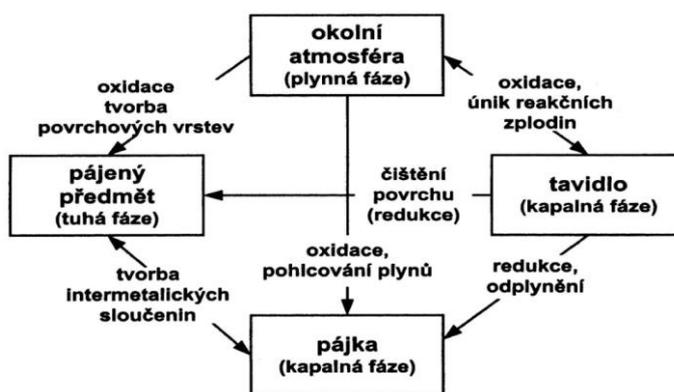
## 2 Diagnostika chyb u propojovacích struktur

Tato část bakalářské práce nás seznamuje již se samotnými propojovacími strukturami, u kterých si popíšeme jejich možné chyby při procesu propojování a kontaktování. Chyby propojovacích struktur jsou rozebrány a popsány jednotlivě. Společně s tím je v této části bakalářské práce nahlédnuto na metody diagnostiky daných chyb u propojovacích struktur. Aplikované metody diagnostiky chyb jsou popsány a porovnány jednotlivě.

### 2.1 Popis možných chyb při procesu propojování

#### 2.1.1 Vznik chyb u pájení

Pokud se chceme dozvědět možný vznik chyb při procesu pájení, musíme se podívat na pájený spoj z pohledu na jeho životnost. Kvalita pájeného spoje je definována jako pravděpodobnost, že pájený spoj bude schopen vykonávat požadovanou funkci po určité časovou dobu. Po tuto dobu, by měl být pájený spoj spolehlivý. Spolehlivost pájeného spoje je jinak řečeno požadavek na dobrou vodivost a bezporuchovost pájeného spoje.[18], [20], [21] Chyby u pájení mohou vznikat již v počátku pájení. Jsou jimi např. oxidace, znečištění, můstky pájky, rozprášení pájky, otevřený spoj atd.[19] Na Obr. 25 je možné vidět složky (příčiny), které mohou způsobit chybu u pájení.

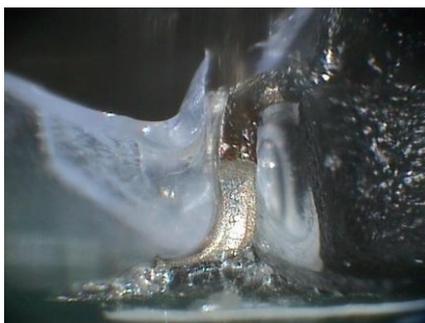


Obr. 25 Schéma vzájemného působení složek u pájecího procesu (zdroj: [1])

#### Oxidace

Převážná většina problémů u pájení je způsobena oxidací povrchu pájeného materiálu. Použité tavidlo, by mělo být schopno oxidační vrstvu odstranit. Může ovšem nastat případ, že

oxidační vrstva je příliš tlustá a použité tavidlo je nedostatečně aktivní pro danou funkci. Je důležité si uvědomit, že s pokovenou úpravou je nezbytné v případě pájení řádně kontrolovat počáteční výrobní proces. Pokud není např. pájecí ploška součástky řádně před pokovením připravena, může na jeho povrchu zůstat vrstva oxidů. Oxidy nám mohou v pozdějším technologickém postupu přivodit další problémy, které se dále negativně odrazí na spolehlivosti vyrobené součástky.[19], [20], [21]



Obr. 26 Vzniklá koroze pod ochranným povlakem (zdroj: [23])

### **Znečištění**

Nežádoucí zbytky, ať již kovové či organické zbytky, se mohou usadit v okolí spoje na povrchu desky. Veškeré druhy těchto nečistot se musí před pájením odstranit, tak aby byl pokud možno spoj dokonale čistý a vhodný pro pájení. Znečištění nám značně znemožňuje schopnost pájet, proto musí být zaručena čistota pájeného spoje pro jeho dobré smáčení.[18], [20]

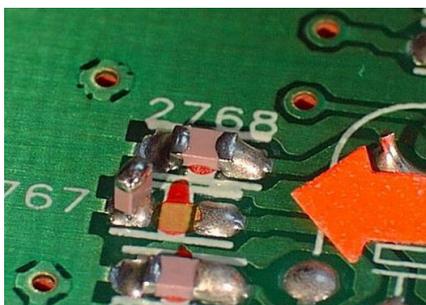


Obr. 27 Znečištění na DPS (zdroj: [23])

### **Nadzvednutí součástky**

Tento jev je také nazýván tombstoning. K jevu dochází při použití technologie povrchové montáže. Součástka, která má dva vývody, je připájena pouze na jedné pájecí plošce. Během

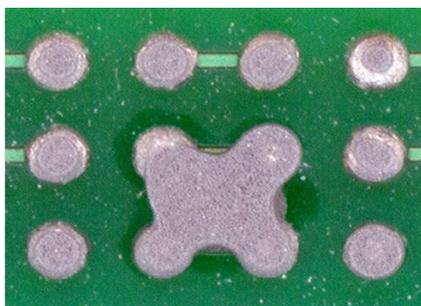
pájení se na této plošce díky vlivu povrchového napětí pájky postaví až do kolmé polohy vůči rovině DPS. Na druhé pájecí plošce tak chybí spoj. Chyba je způsobena díky rozdílné smáčivosti vývodů nebo plošek, nerovnoměrnému ohřevu součástky, odlišnému množství prstovité pájky na ploškách.[23]



Obr. 28 Nadzvednutí součástky SMD (zdroj: [23])

### Můstky pájky

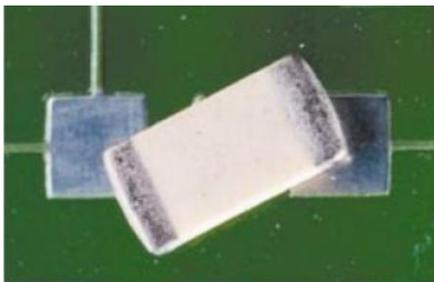
Je chyba, která vytváří zkrat. Je nejčastější chybou při procesu pájení. Chyba vzniká na povrchu DPS mezi vodiči nebo také mezi sousedními vývody součástky. Je důležité dodržovat určené množství pájecí pasty k nanášení. Pokud nebude dodrženo určené množství pro nanášení, mohou vznikat můstky pájky.[23]



Obr. 29 Vznik můstku pájky díky nadměrnému nanesení pájecí pasty (zdroj: [23])

### Nesprávné umístění součástky

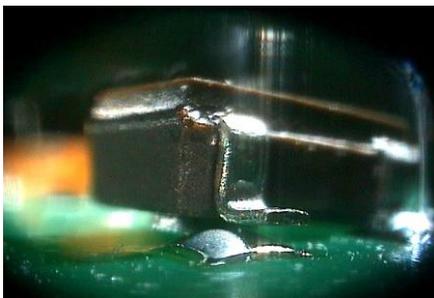
Tato chyba je způsobena špatným osazením součástky. Součástky, které jsou s malou chybou usazeny (šikmo, posunutě), mohou být u povrchové montáže vlivem povrchového napětí roztavené pájky usazeny do správné polohy na kontaktní plošky na DPS. Pokud je součástka osazena se špatným pootočením o více jak polovinu šířky dané pájecí plošky, nemusí dojít ke správnému zapájení dané součástky.[23]



Obr. 30 Chybné osazení součástky na DPS (zdroj: [28])

### Otevřený spoj

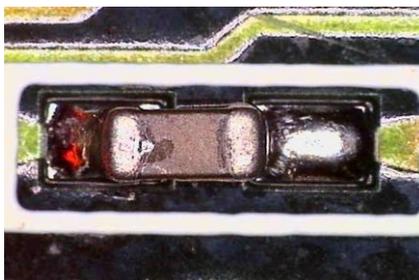
Otevřený, nedolehlý spoj je chyba, při které nedochází ke spojení (dosednutí) vývodu součástky na pájecí plošku DPS. Spoj může vzniknout vzlínáním pájky po vývodu součástky. Tvar vzlínání bývá obvykle kapilára.[23]



Obr. 31 Otevřený spoj bez vyvzlínání pájky po vývodu součástky (zdroj: [23])

### Chybějící spoj

Tato chyba je druhou nejčastěji se vyskytující. Vzniká při špatném zatékání pájky, špatné smáčivosti. Špatně vysušené tavidlo, má za následek špatný předeheřev při pájení vlnou. Chybné množství nebo zcela postrádající množství pastovité pájky na pájecí plošce při pájení přetavením bývá také důvodem chybějícího spoje.[23]



Obr. 32 Chybějící spoj mezi deskou a součástkou (zdroj: [23])

### **Rozprášení pájky**

Tato chyba může vzniknout při nedostatečném odstranění těkavých složek z pastovité pájky u pájení přetavením. Těkavé složky se při zahřátí prudce změní v páry. To má za následek rozprášení (rozmetání) kuličky pájky v okolí pájecí plošky a po DPS. Náhodně rozprášené kuličky pájky pak mohou na DPS způsobit při provozu zkraty.[23]

### **2.1.2 Vznik chyb u lepení**

Chyby u lepení v elektronice vznikají s menší četností než u technologie pájení. Velmi častými problémy u technologie lepení jsou problémy s nanesením a teplotní závislost viskozity lepidla. Společně s těmito problémy souvisí i odpadávání součástek při pájení vlnou a tažení vláken lepidla.[12]

#### **Nanášení lepidla**

V případě lepení je možná chyba při procesu nanášení lepidla. V případě nanesení malého množství lepidla na DPS se nepřichytí součástka. Ta poté může odpadnout. Případně se přichytí, ale s možností neúplného dolehnutí kontaktů nebo jejich pootočení. Je vhodné kontrolovat množství nanášeného lepidla. U většího množství nanesení lepidla je možnost, že lepidlo bude vytlačeno plochou součástky na pájecí plošky. Zavádí se tedy tzv. slepé plošky, na které je možné lepidlo nanést bez obav, že by se dostalo na kontaktovací plošky. [12]

#### **Viskozita lepidla**

Viskozita nebo jednoduše řečeno tečení lepidla by mělo být nastaveno velmi vhodně. Lepidlo by nemělo být příliš tekuté a naopak. Tekuté lepidlo by se nám mohlo roztéci po ploše DPS, tím ji znečistit a znehodnotit. U tuhého lepidla by se mohlo stát, že by lepidlo nepřichytilo součástku a předčasně vytvrdilo.[12]

#### **Tažení vláken**

U nanášení lepidla je nežádoucí element tzv. tažení vláken lepidla. Pokud nanášíme lepidlo, nejčastěji v kapkách. Chceme, aby se kapka přichytila na DPS a až následně k součástce. Pokud se kapka lepidla táhne s dávkovačem po nanesení, jde o chybu, kterou se snažíme odstranit. Následné tažení kapky lepidla může znečistit a znehodnotit DPS.[12]

### **Přilnavost lepidla**

Jde o chyby, které se projevují, až po vytvrzení lepidla. Přilnavost (adheze) součástky je důležitá z důvodu, aby součástka neodpadla z DPS. Jde o přilnavost dvou rozdílných materiálů, které se mají spojit. Součástka je zkoušena způsobem, kdy je spoj odtržen silou kolmou k rovině připojovací desky.[1]

### **Pohyb částic**

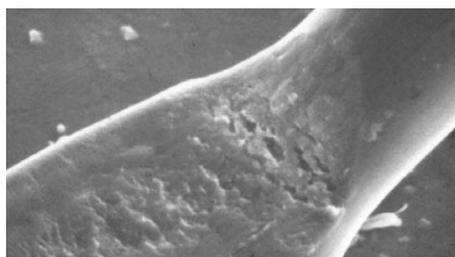
Pohyb vodivých částic (iontová migrace) je zvláště nebezpečná. Vodivé částice jsou tvořeny především ze stříbra (Ag) nebo jiných kovů, na kterých je povrchová vrstva tvořena z Ag. Připojovací plošky mohou mít velmi malou připojovací rozteč. V těchto případech může dojít ke zkratu mezi sousedními spoji. Je důležité dodržovat předepsané rozteče spojů a množství nanášeného lepidla.[12], [14]

### **2.1.3 Vznik chyb u připojování mikrodrátky**

V případě připojování integrovaných čipů pomocí mikrodrátků dochází k několika chybám, které se postupem času odstraňovaly. Odstraněním většího množství chyb nám pomohlo zavést tuto propojovací technologii do sériové výroby pro komerční účely. Ovšem i po odstranění většího množství chyb, které mohou vzniknout v průběhu procesu zhotovování, zde zůstaly některé chyby, na které dbáme zvýšené opatrnosti po dokončení procesu propojení.[1]

### **Vznik prasklin u spojů**

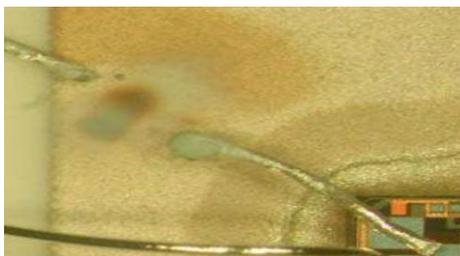
Nejčastějším místem, kde dochází k tvoření chyb, je u kontaktovací hlavy. Zde jsou připojovací drátky vystavovány namáhání v podobě kontaktovací hlavy (klínu), která musí pro kvalitní připojení mikrodrátku, deformovat mikrodrátek v pohybu dopředu a zpět. Tato chyba se nejčastěji objevuje u ultrazvukového svařování. Tyto chyby lze snížit za pomoci tažné síly kontaktovací hlavy.[22]



Obr. 33 Prasklina po připojení pomocí klínu (zdroj: [29])

### Teplota kontaktování

U kontaktování pomocí termokompresy může docházet k narušování spoje v místě kontaktování. Zvýšená teplota zde může způsobit mikroprasklinky, které se projeví až po uplynulém čase. Důvodem je rozdílná tepelná roztažnost kontaktovacího materiálu a kontaktovací hlavy. Může také dojít k úplnému přepálení mikrodrátku.[22]



Obr. 34 Přepálení mikrodrátku v průběhu kontaktování (zdroj: [22])

### Ohyb mikrodrátku

K chybě dochází také v případě ohybu mikrodrátku u patky spoje. Nejběžněji k této chybě dochází u ultrazvukového svařování. Na patce spoje vznikají mikroprasklinky, které se mohou v průběhu kontaktování dále rozšířit. Tato chyba se dále objevuje u tepelného namáhání, kde hraje velkou roli roztažnost jednotlivých materiálů (kontaktovací hlavy, mikrodrátku).[22]



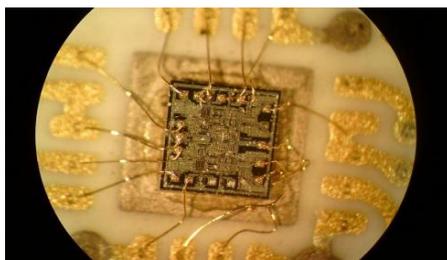
Obr. 35 Vznik ohybu, zvlnění mikrodrátku (zdroj: [30])

### Koroze mikrodrátků, kontaktovací desky

Pokud dojde u čipu ke korozi, dochází k oddělení jednoho nebo obou konců spoje od čipu a kontaktovací desky. Dochází k samovolnému pohybu drátků uvnitř čipu, pokud je zapouzdřený. Může docházet ke zkratům nebo vytváření chybných operací uvnitř zapouzdřeného čipu. Koroze je závislá na přítomnosti vlhkosti, z které vychází. Zapouzdřený čip by měl být pokud možno co nejčistější. Tím se zamezí případnému vzniku koroze.[22]

### Kroucení mikrodrátku

Tato chyba se považuje za viditelnou. K chybě může dojít již na začátku kontaktování nebo také v případě, kdy je čip již namáhán a je zapouzdřen. Drátek se nejčastěji deformuje do boku od provedeného spoje v jeho směru. Chyba je závislá na velikosti zkřivení drátku. Chceme vždy docílit co nejkratšího, tedy rovného spoje. U čipu jsou dány a rozvrženy cesty spojů, tak aby byly co nejefektivněji využity v propojení. Je důležité je dodržovat.[22]



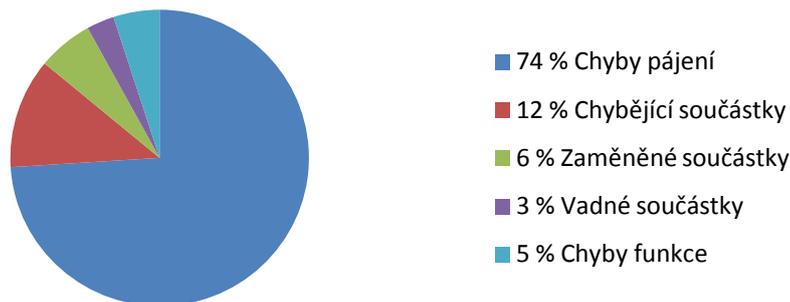
Obr. 36 Viditelné kroucení mikrodrátku - 40x zvětšeno (zdroj: [28])

## 2.2 Přehled aplikovatelných metod diagnostiky chyb

Je velice nepravděpodobné, že by všechny výrobky opouštěly výrobní linky, oddělení, výrobní sektory bez jakékoliv závady. Výrobci se k tomuto ideálnímu stavu bez závad pouze přibližují. Pro výrobce je to velice závažná situace. V případě, kdy by výrobce odstranil z velké míry závady na výrobku, a ten by měl po dobu života výrobku stoprocentní spolehlivost, bezporuchovost, by jeho celková cena rapidně vzrostla. Ovšem kvůli cenám na trhu, kdy se výrobci snaží být konkurenceschopní, je to nerealizovatelné. Výrobci nezaručí, že se neobjeví žádná závada po celou dobu životnosti výrobku.[11]

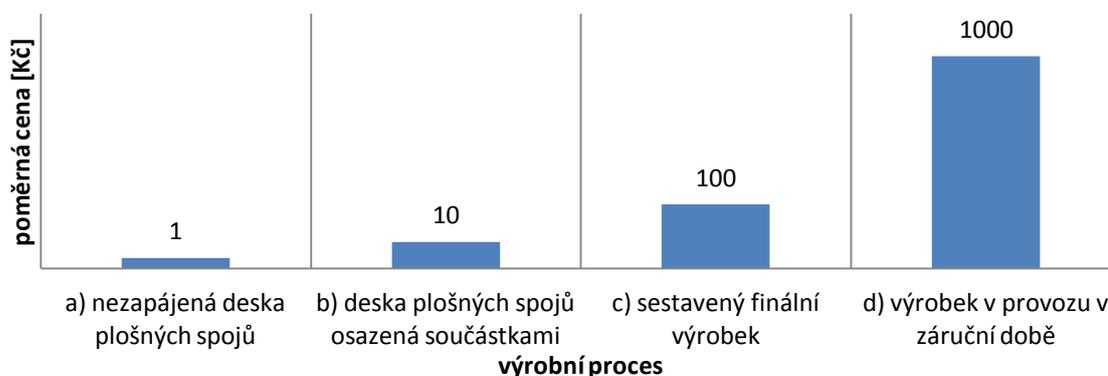
Výrobci mají k dispozici mnoho kontrolních metod, kterou mohou použít k zjištění závad na jejich výrobku. Dnes stále není přesně dán postup, nejsou vymezena kritéria, kterým by se měli výrobci řídit v případě, že kontrolují svůj výrobek. Kontrola, hodnocení kvality výrobku se může provádět na celé řadě různých testů.[1], [11]

V průběhu praxe se ukázalo, že nejčastěji zhruba 80 – 95 % závad se tvoří při technologickém procesu u montáže desek s plošnými spoji. Následují je chyby součástek a mechanických prvků.[19]



Obr. 37 Podíly vzniklých chyb při výrobě (zdroj: [19])

Vzniklé závady je třeba především odhalit a následně je odstranit již ve výrobě. U výrobců je dobře známo pravidlo deseti. Toto pravidlo je ověřeno samotnou výrobou. Pravidlo deseti zcela jasně říká, že chyba, která je odhalena na počátku výroby, stojí výrobce její následné odstranění 10-krát méně, než kdyby chyba byla objevena a odstraněna na dalším technologickém postupu. Jednoduše řečeno, výrobce stojí odstranění závady na dalším kroku výroby 10-krát více. Výrobci by se měli snažit odstranit závady již v počátku, tedy na místě jejich možného vzniku. Důvodem je ušetření nákladů vynaložených na jeden výrobek.[11], [19]



Obr. 38 Pravidlo deseti (zdroj: [19])

### 2.2.1 Diagnostikování kvality pájených a lepených spojů

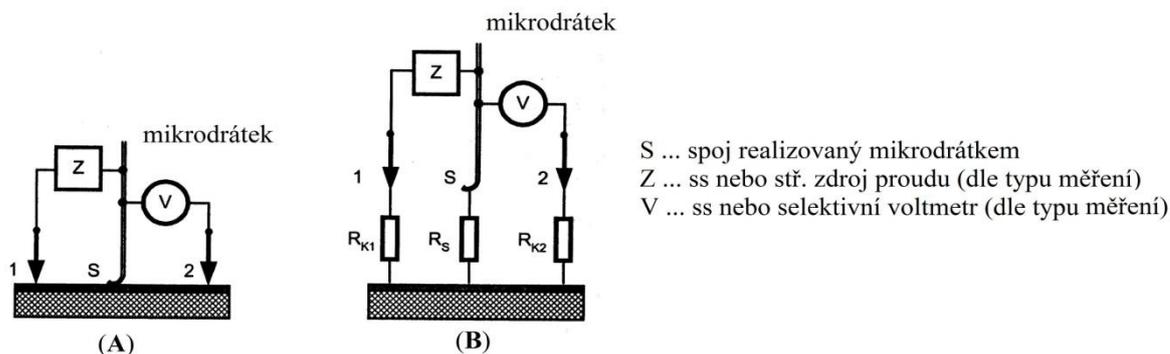
Diagnostikování kvality spojů se provádí několika řadami testů, základními jsou testy pájených a lepených spojů, prováděné testy můžeme spojit, [1]:

- **Sledování struktury materiálového spoje** – je v průběhu tepelného stárnutí prováděno optickou elektronovou mikroskopií.

- **Sledování tvaru spoje** – je obvykle prováděno optickou mikroskopií (záleží na smáčivosti, kvalitě pájky a tavidla).
- **Sledování elektrických vlastností spoje** – s nahlédnutím na elektrické vlastnosti spoje se sleduje převážně elektrický odpor.
- **Sledování adheze spoje** – tento parametr je měřen „pull-off“ testem. Spoj je odtržen silou, která je kolmá k rovině propojovací desky.
- **Sledování migrace iontů** – je prováděno především u lepených spojů. Vodivé částice mohou způsobit zkrat mezi sousedními (propojovacími) ploškami s malou roztečí. Sledování se provádí optickým nebo elektronovým mikroskopem.

### 2.2.2 Diagnostikování kvality spojů vytvořeného mikrodrátkem

- **Metody pro testování elektrických vlastností** – z elektrických vlastností je nejčastěji sledován elektrický odpor vytvořeného kontaktu. Dále to bývá šum a nelinearita voltampérové charakteristiky. K měření elektrických vlastností je užíváno uspořádání v Obr. 39. Část (A) ukazuje skutečné uspořádání měření. Zdroj Z je stejnosměrný zdroj proudu, pokud je měřen odpor a šum spoje S a sinusový zdroj proudu v případech měření nelinearity voltampérové charakteristiky spoje. Zdroj V je stejnosměrný voltmetr, pokud je měřen odpor a střídavý milivoltmetr v případech měření šumu a nelinearity. Střídavý milivoltmetr umožňuje nastavení odlišných měřících frekvencí a různé šířky pásma vstupního filtru. Část (B) Obr. 39 zobrazuje náhradní schéma. Odporů  $R_{K1}$  a  $R_{K2}$  představují odpory měřících kontaktů vytvořených na vodivé vrstvě a  $R_S$  odpor kontaktu připojeného mikrodrátku. Při měření je kontaktní odpor  $R_S$  kontaktu S napájen proudem. Proud protéká vodivou vrstvou přes odpor  $R_{K1}$  měřícího kontaktu 1 zpět do zdroje. Na odporu  $R_S$  vzniká napětí, které je měřeno voltmetrem V přes odpor  $R_{K2}$  na měřícím kontaktu 2.[1]



Obr. 39 Schéma pro měření odporu, šumu a nelinearity spojů provedených pomocí mikrodrátku; (A) Skutečné schéma pro měření; (B) Náhradní schéma pro měření (zdroj: [1])

- **Metody pro testování mechanických vlastností** – z mechanických vlastností je pozorována především pevnost v tahu. Použitý mikrodrátek je na dvou místech přichycen na kontaktovací plošku tak, aby tvořil smyčku. Smyčka je zachycena háčkem, ta je vytahována kolmo vzhůru a měří se síla, u níž dojde k odtrhu drátku od kontaktovací plošky. Případně přetrnutí drátku. Pokud je drátek dobře připojen, je síla potřebná pro přerušení kontaktu s ploškou větší než síla potřebná pro přetržení drátku.[1]

## 2.3 Kontrolní metody a systémy

Rozdělení kontrolních metod a systémů k diagnostikování spojů je uvedeno níže s následným popsáním jednotlivých metod.

### Rozdělení kontrol a systémů:

- optické,
- elektrické,
- klimatické,
- mechanické.

### 2.3.1 Optické kontroly

V případě optických kontrol u spojů se posuzuje a hodnotí povrch spoje (hladký, lesklý, neporézní, spojitý, u bezolovnatých spojů se posuzuje povrch matný, hrubý), smáčení spoje

(všechny plochy, plně vyplněné pájkou, úhel smáčení), množství pájky (správné množství, dle typu spoje, vždy by měl být poznán obrys pájených vodičů), odsmačení spoje (bez známek, částečné), poškození spoje (škrábance, kuličky, dírky, praskliny, ostré hrany) a možné propojení (můstky) spoje k okolním vodičům.[11], [18], [19]

Kontrolováno je zda nechybí součástky, v případě špatného usazení, zda nejsou pootočené. Při osazování DPS dochází i k záměně součástek, kontrolují se tedy i druhy usazených součástek. U optických kontrol jsou dvě základní podskupiny.[19]

### **Rozdělení optických kontrol a testů:**

- vizuální,
- automatické optické inspekční (AOI).

## **Vizuální kontroly**

Mezi nejběžněji využívané neelektrické, vizuální kontroly (VK) patří lidský zrak. Je využíván pro jednoduchost a nejlevnější náklady. Důraz se klade na zkušenosti operátora, který vykonává kontrolu výrobku. Zrak operátora je jediná věc, která může omezit činitel zjištění závad. K tomuto způsobu je nastavba v podobě dílenské lupy nebo mikroskopu. Tyto pracovní pomůcky nám poskytnou možnost kontrolovat desky s vyšší hustotou osazených součástek. Pomáhají nám vylepšit zrakové možnosti operátora.[11], [18], [19]

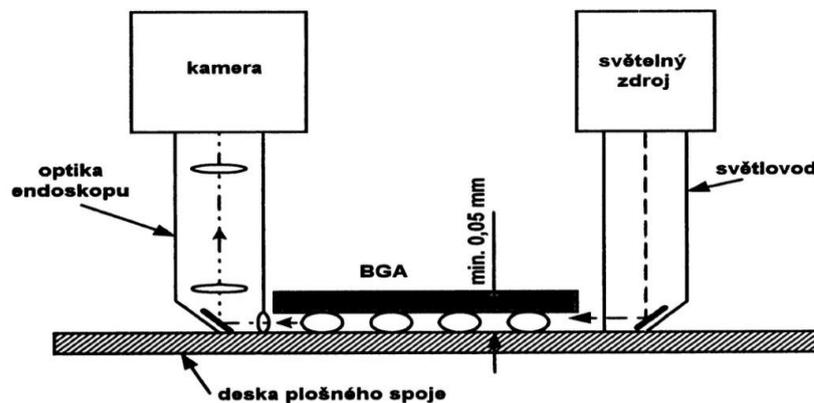


Obr. 40 Stereo mikroskop pro vizuální kontrolu (zdroj: [28])

Úspěšnost vizuální kontroly je závislá na schopnostech operátora, který danou kontrolu vykonává. Především záleží na zodpovědnosti, soustředění a připravenosti operátora. Operátor ovšem nepozná vady, které se skrývají uvnitř spoje. Drobné prasklinky, špatná krystalová mřížka, odsmačení spoje, nesmačivá místa.[11], [19]

## Endoskop

Ke zlepšení zjištění vad lze využít kontrol prováděných pomocí endoskopu. Endoskop je optický přístroj, který je tvořen z optiky endoskopu a na vstupu je doplněn o hranol lomící paprsky zdroje světla pod úhlem  $90^\circ$ . Využívá se pro kontrolu náročnějších, obtížněji přístupných míst. Díky své konstrukci vykonávají endoskopy nedestruktivní diagnostiku prostřednictvím obrazu, který je přenesen na monitor. Endoskop může obraz zvětšit, případně digitálně vylepšit obraz. Jako zdroj světla se u endoskopu využívá halogenových, xenonových, halogenidových zdrojů. [26]



Obr. 41 Schéma optického zařízení Endoskopu s pomocným protisvětlem (zdroj: [1])

### Výhody VK, [19]:

- odhalené otočené součástky,
- odhalené chybějící součástky,
- zjistitelné chyby pájení (např. barva spoje, množství pájky, tvar spoje, nezapájené vývody spojů),
- finančně méně náročné,
- odhalené zaměněné součástky.

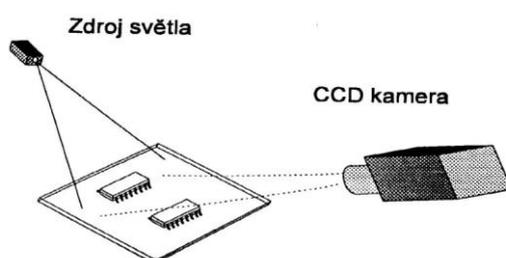
### Nevýhody VK, [18]:

- kontrolu provádí zkušený pracovník (není vždy jednoznačnost výsledku),
- nelze odhalit elektrické závady,
- odhalení závad (zkrat, nezapájené BGA) je pomalé a pracné.

## Automatické optické inspekční testovací systémy

### Kamerové kontroly

Nejjednodušší způsob je porovnávání dvou obrazů za pomoci kamery a zdroje světla. Jeden obraz pochází z vyrobené desky, předložené ke kontrole. Druhý obraz je z bezchybné předlohy, který je uložen v počítači ke srovnání. Zjištěné rozdíly společně s chybami jsou vypsané do protokolu chyb i s místem nálezu. Vyhodnocování snímaného obrazu je prováděno počítačem za pomoci snímání obrazu kamerami, srovnání obrazů nám odhalí veškeré závady zmíněné výše u popisu chyb.[11], [19]



Obr. 42 Schéma optické kontroly pomocí kamery, typické uspořádání (zdroj: [14])

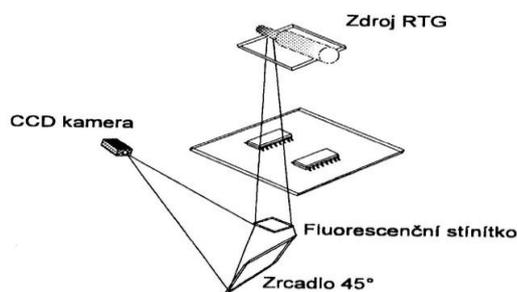


Obr. 43 Zařízení pro kontroly AOI (MIRTEC MV-2HT) (zdroj: [28])

### Rentgenové kontroly

Rentgenové kontroly nám pomáhají odhalit skryté vady ve spoji. Rentgenová metoda je založena na počítačovém zpracování obrazu získaného příčnými řezy zkoumaného spoje (výrobku). Je zajištěno preciznější prozkoumání jinak skrytých náhledů do spoje. U rentgenové kontroly je využívána tzv. laminografie, která nám umožní v hustě osazeném místě vyjmout pouze potřebný obraz k porovnání. Tato metoda je také známa z medicíny, kde je nezývána jako tomograf. Laminografie je potřebná např. u PGA a BGA pouzder. Za

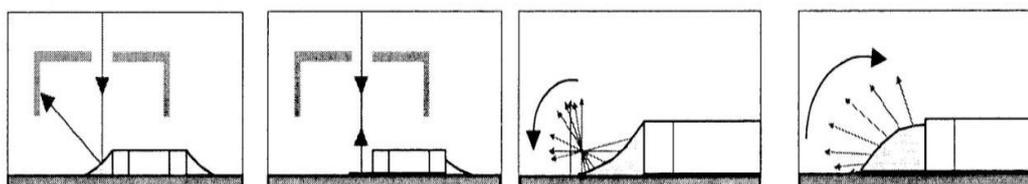
pomocí zpracování jasového signálu z jednotlivých vrstev můžeme spolehlivě dále určit kvalitu provedených technologických postupů. Lze snadno nahlédnout i na kvalitu vyplnění pokovených otvorů pájkou. Pomocí rentgenové kontroly jsou kontrolována zejména náročnější zařízení a hustě osazená místa.[11], [18], [19]



Obr. 44 Schéma rentgenové kontroly, typické uspořádání (zdroj: [14])

### Laserové kontroly

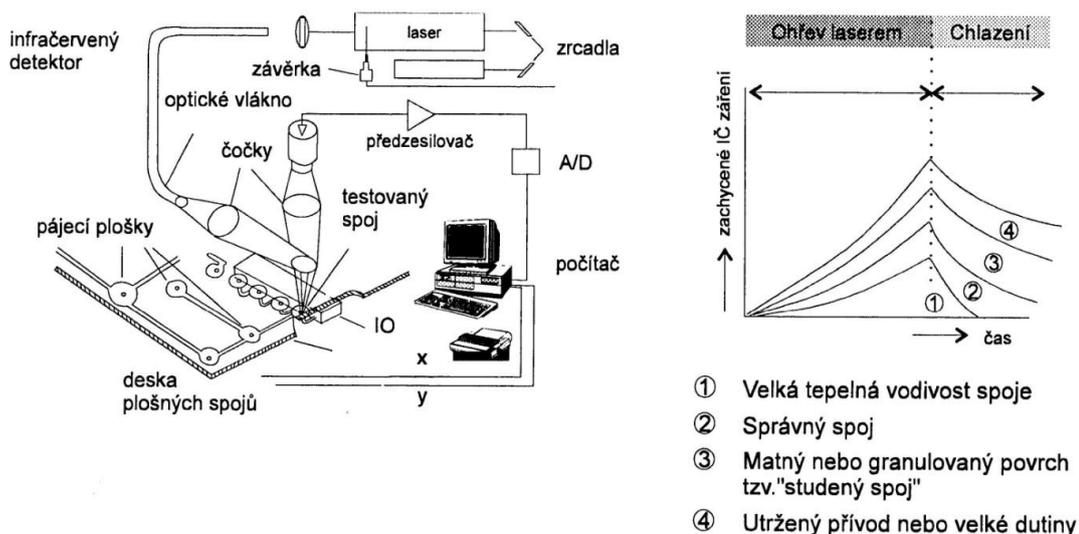
V případě použití laserové kontroly se jedná o dva způsoby kontroly spoje za pomoci svazku laseru.[19] První kontrola je založena na postupném snímání obrazu pájené desky plošného spoje nízkovýkonovým laserovým svazkem vychylovaným ve směru X. Deska je posouvána ve směru Y. Pomocí vyhodnocování dopadajícího paprsku na DPS je získán tzv. výškový profil všech součástek umístěných na DPS. Pomocí tzv. odměřování se získá tvar spoje, rozměry, výška vzlínání a celková kontrola úplnosti a správnosti osazení DPS, a samozřejmě také správného zapájení DPS. Paprsek lze také zaměřit i pod součástky, docílíme tím lepší optické kontroly samotných součástek.[11]



Obr. 45 Kontrolované části pájeného spoje pomocí laseru (zdroj: [19])

U druhé kontroly se využívá svazku laseru, který kontroluje jednotlivé pájené spoje ohřátím za pomoci výkonového laserového impulsu. Podobný princip jako u pájecího laserového zařízení. V zařízení je využíváno dvou laserů. První, nízkovýkonový s červeným světlem slouží k navigaci na příslušný spoj. Druhý, výkonový pulsní laser, který má vlnovou

délku 1,06  $\mu\text{m}$  s výkonem zhruba 30 W slouží k zahřívání pájených spojů. Součástí zařízení je i infračervený detektor. Ten pracuje ve fotovoltaickém módu. Tím je bezdotykově měřena teplota povrchu pájeného spoje. Jedná se o princip kontroly dobrého spoje se správným množstvím pájky a s lesklým, hladkým povrchem spoje, který lze charakterizovat určitou tepelnou kapacitou. Jestliže je takový spoj vystaven krátkodobému pulsnímu ohřevu laserovým svazkem, vzroste jeho teplota na určitou hodnotu. Po skončení teplota klesá.[11]



Obr. 46 Laserová kontrola kvality pájeného spoje (zdroj: [14])

**Výhody AOI, [19]:**

- odhalené otočené, zaměněné, chybějící součástky,
- zjistitelné chyby pájení (např. barva spoje, množství pájky, tvar spoje, nezapájené vývody spojů),
- výsledek kontroly je jednoznačný,
- rychlost zjištění závad je velmi rychlá a přesná,
- obsluhu provádí zaučený pracovník.

**Nevýhody AOI, [19]:**

- nelze odhalit elektrické závady,
- odhalení závad je možné pouze na viditelných místech (není možné u vývodů pod součástkou), naopak výhodou je tomu u rentgenové kontroly, která je schopna odhalit závady pod vývody součástky,
- náklady a čas potřebný na tvorbu programu (kamerové systémy, osvětlení).

## 2.3.2 Elektrické kontroly

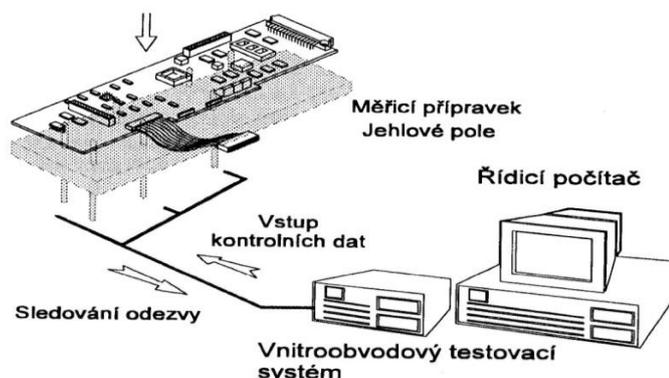
Pokud splníme požadavky optické kontroly, je na řadě elektrická kontrola. Osazené desky plošných spojů je nutné elektricky testovat. Elektrické testy v několika úrovních jsou dnes nedílnou součástí celkového procesu výroby. Pokud nechce výrobce zbytečně vynakládat další náklady na opravu reklamovaných výrobků, musí tyto elektrické, ale i optické testy provést. Elektrické kontrolní testy se dělí na dva základní typy.[11], [19]

### Rozdělení elektrických kontrol a testů:

- vnitroobvodové (In-circuit, MDA),
- funkční.

## Vnitroobvodová kontrola

Jako první se provádí u elektrické kontroly vnitroobvodový test (VOT), neboli také In-circuit (v obvodu), či MDA (Manufacturing Defect Analyzing – výrobní poruchové analyzování) test. Tato kontrola je zaměřena na měření základních parametrů součástek (např. měření odporu, kapacity, indukčnosti) po jejich kontaktování na DPS. Samotný název nám již říká, že půjde o měření v obvodu. Měření je prováděno měřicí jehlou (sondou) na každém uzlovém bodu příslušného elektrického schématu. Sonda je schopna přenášet a snímat informace (měřené elektrické signály) z DPS do testovacího systému. Zmíněná metoda, nám napomáhá snadno a rychle řešit jednoduché závady, nelze ovšem přesně simulovat vlastní funkci desky. Jednoduché, triviální závady podstatně převyšují závady funkční. Vnitroobvodová kontrola pomáhá tyto závady odhalit. Z celkového počtu závad na DPS se pohybují základní, jednoduché závady zhruba u 90 %.[11], [19]



Obr. 47 Vnitroobvodový test osazené DPS (zdroj: [14])

**Chyby odhalitelné pomocí VOT, [27]:**

- zkraty,
- přerušení,
- chybějící součástky,
- vadné součástky,
- mimotoleranční součástky,
- otočené součástky,
- nezapájené vývody,
- závady funkce (dle vybavy testovacího systému).

**Výhody VOT, [27]:**

- až 95 % účinnost testu (dle charakteru desky a kvality programu),
- obsluhu může provádět pouze zaškolený pracovník,
- nalezení závady je rychlé a přesné (nalezení závady s přesností na součástku),
- rychlost testu je velmi vysoká.

**Nevýhody VOT, [27]:**

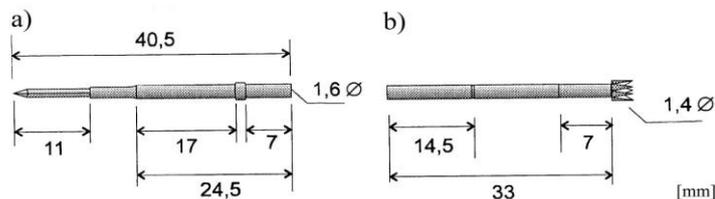
- součástka není testována dynamicky,
- integrované obvody nepracují v reálném čase,
- nelze zjistit závadu více součástek najednou,
- pořizovací cena je vyšší,
- příprava programu a jehlového pole zabírají delší dobu (obvykle 1 až 2 dny).

Výhody, které tento systém přinese, jsou pro výrobce veliké, především snížení nákladů na případné opravy. Výrobce se může spolehnout, že DPS je dobře osazena a zapájena. Tento test napomáhá snižovat množství reklamací, které by mohl uplatňovat nespokojený zákazník.[19]

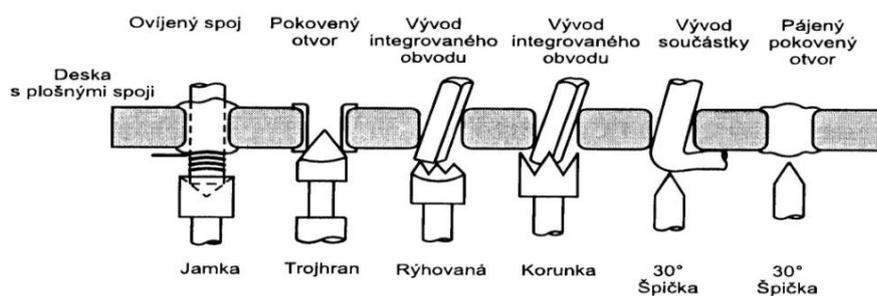
**Kontaktování**

Je prováděno jehlovým polem. Jehlové pole poskytuje možnost připojit měřící systém k osazené desce plošných spojů. Jehly (sondy) jsou speciálně přizpůsobené typům desek a kontaktům na nich. Jehly jsou odpružené, aby mohly vyrovnávat rozdíly v poloze dosedacích míst. Odpružení nám zaručuje i dostatečnou dosedací sílu na spoj. Síla je obvykle 1 až 2 N.

Zvolená jehla musí vždy perfektně dosedat na měřené místo, a proto se musí vhodně zvolit i hrot jehly. Měřicí jehla má tvar hrotu např. špičky nebo korunky, ale také i lůžka s dutinou.[11], [19]



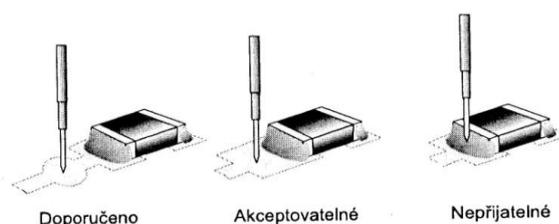
Obr. 48 Kontaktovací jehla se zakončením; a) hrotu; b) rýhovaného lůžka (zdroj: [14])



Obr. 49 Možné tvary lůžek jehel (zdroj: [19])

**Pro kvalitní připojení měřicí jehly je důležité dodržet určitá pravidla testovacího bodu,** [19]:

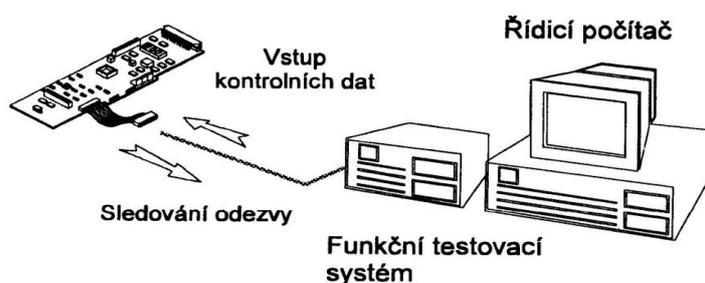
- testovací bod musí mít vhodný průměr, aby měřicí jehla mohla spolehlivě dosednout,
- testovací bod nesmí splývat s pájecí ploškou. Naskytla by se možnost neúměrného rozlití pájky v průběhu procesu pájení. (Z důvodu šetření místa se ovšem tato technika někdy používá.),
- množství testovacích bodů musí být kompromisem mezi potřebou testování a velikostí desky. Velké množství testovacích bodů může způsobit značné zvětšené rozměry desky. To nám zapříčiní ztrátu významu používání SMD součástek.



Obr. 50 Vhodné umístění kontaktních jehel u SMD (zdroj: [19])

## Funkční kontrola

Jedná se o kontrolu funkčnosti, budou zde tedy elektrické zkoušky, které jsou u funkční kontroly (FK) nezbytné. U funkční kontroly se jedná o ověření funkčnosti celku nebo dílčích podcelků DPS. K funkční kontrole využíváme buď konektory na DPS, které připojíme ke kontrolnímu testovacímu zařízení nebo můžeme použít jehlová pole, která dosedají na jednotlivá měřící místa. U obou těchto případů spočívá test na stejné bázi. Zvolený testovací systém posílá elektrické signály do kontrolované desky plošných spojů. DPS je pod napájecím napětím. To znamená, že je oživena. Následně se sledují odezvy, z kterých je možné vyčíst závadu. Zjišťování jednoduchých závad může být zdlouhavé a pracné. Ovšem deska bude pečlivě zkontrolována a navíc bude kontrolována jako při skutečném provozu v zátěži.[11], [19]



Obr. 51 Funkční test osazené DPS (zdroj: [14])

### Výhody FK, [27]:

- součástky jsou testovány dynamicky,
- snadné připojení desky k testovacímu zařízení (pomocí konektoru),
- DPS je zkoušena v reálném čase,
- prověření logické sítě.

### Nevýhody FK, [27]:

- vadné součástky jsou špatně dohledatelné,
- zařízení obsluhuje kvalifikované obsluha,
- testovací program má složitý návrh (příprava programu zabere více času),
- časově náročné určení závady.

### **2.3.3 Klimatické kontroly**

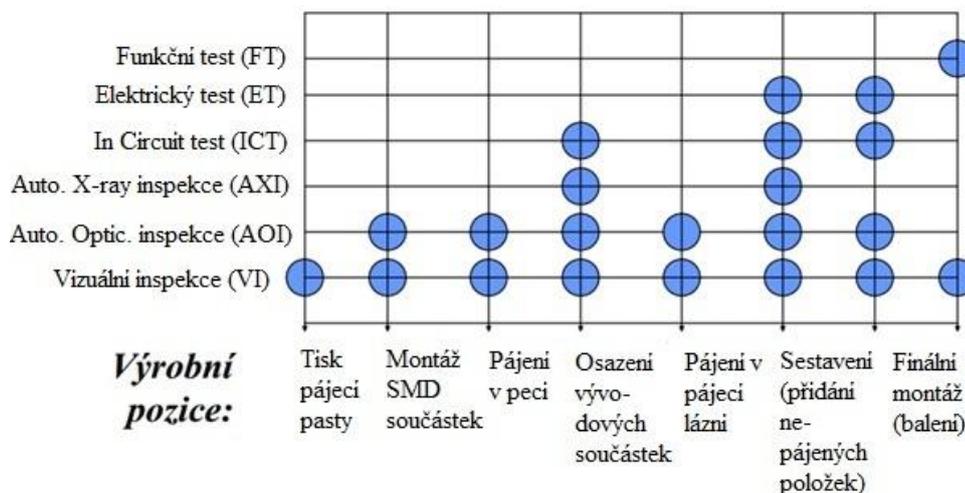
Klimatické kontroly jsou důležité pro ověření prostředí, ve kterém může daný výrobek bezchybně pracovat. Jde tedy o testy životnosti a spolehlivosti pro určitá prostředí. V klimatických testech jsou především zkoušena a kontrolována zařízení v určitých teplotních rozsazích, společně s teplotním rozsahem je zařízení podrobena i kontrole vlivu vlhkosti. Teplotní rozsah a vlhkost prostředí jsou hlavními kritérii, která jsou důležitá pro správný a bezchybný chod zařízení. Je možné dále zkoušet další rozdílné vlivy prostředí, např. slané prostředí, náhlé teplotní změny, přítomnost prachu nebo písku, chemické vlivy atd. Je ovšem samozřejmostí, že rozdílné testy budou probíhat pro zařízení umístěné v domácnosti a jiné kontroly pro zařízení s venkovním využitím.[19]

### **2.3.4 Mechanické kontroly**

V mechanických kontrolách jsou výrobky podrobena různým zatěžkávacím zkouškám, které způsobí jejich následné znehodnocení. Výrobky se podrobují zkouškám např. vibracemi, pády, otřesy, náhlými pády, tahem atd. Zde opět platí rozdílnost kontrol pro jednotlivá zařízení, která mohou být umístěna v rozdílných prostředích.[19]

### 3 Porovnání diagnostikování chyb

Tato část bakalářské práce je zaměřena na porovnání výše zmíněných diagnostikovaných chyb, které mohou vzniknout v průběhu propojování. Chyby mohou vzniknout v jakémkoliv okamžiku výrobního procesu. Na Obr. 52 je znázorněno, kdy má proběhnout příslušná kontrolní metoda při výrobním procesu (před nebo po určitém úkonu), aby byla zvýšena možnost odhalení vzniklé chyby a byly minimalizované náklady na její odstranění.



Obr. 52 Vhodný sled kontrol a testů při výrobě DPS (zdroj: [24])

#### Nejpříznivější stav

Pokud bude snaha dosáhnout co nejlepších výsledků v diagnostikování chyb, a tím zvýšit kvalitu výrobku, je zapotřebí využít všech dostupných kontrolních metod a systémů, které jsou uvedeny výše. Optické kontroly mohou poskytnout odstranění triviálních chyb zhruba z 90 %. Jestliže k optickým kontrolám zavedeme i elektrické kontroly, může se úspěšnost bezchybnosti zařízení pohybovat i okolo 97 %. Nelze ovšem zaručit, že výrobní proces bude 100 % úspěšný. Srovnání náročnosti optických a elektrických kontrol je zde uvedeno v Tab. 3, jedná se o srovnání prováděných zkoušek na DPS s osazenými SMD součástkami.

Tab. 3 Porovnání elektrické a vizuální kontroly prováděné člověkem, vnitroobvodového (In-circuit – MDA) testovacího systému a automatického optického inspekčního (AOI) testovacího systému (zdroj: [19])

	<b>Kontrola vizuální (optická) (mikroskop)</b>	<b>Kontrola elektrická (člověkem) (měř. přístroji)</b>	<b>MDA nebo In-circuit testovací systém</b>	<b>AOI – automatický optický testovací systém</b>
<b>Jednoznačnost kontroly</b>	Záleží na jednotlivém pracovníkovi, výsledky nemusí být vždy stejné.	Záleží na jednotlivém pracovníkovi.	Jednoznačné výsledky.	Zařízení dává jednoznačné výsledky.
<b>Rychlost zjištění závady</b>	Pomalá a pracná.	Pomalá a pracná.	Velmi rychlá (10-tiny sekundy).	Velmi rychlá (10-tiny sekundy).
<b>Nároky na obsluhu</b>	Zkušená pracovní síla.	Velmi kvalifikovaná pracovní síla.	Zaučený pracovník.	Zaučený pracovník.
<b>Zjištění elektrické závady</b>	Ne.	Ano.	Ano.	Ne.
<b>Zkratky QFP, PLCC, nezapájené BGA</b>	Pracně a dlouho, výsledek není 100%.	Pracně a dlouho.	Snadno a rychle.	Zkratky pouze na místech kam „vidí“ tester.
<b>Podklady k DPS</b>	Dobrá DPS (zkušenosti pracovníka).	Obvodové schéma, dobrá DPS.	Obvodové schéma, Gerber data, dobrá DPS.	Pouze dobrá DPS. Možnost chyby elektrické funkce.
<b>Náklady na testování</b>	Náklady na měřicí techniku.	Náklady na měřicí techniku.	Programování. Jehlové pole, čas a tvorbu programu.	Programování. Náklady na tvorbu programu.
<b>Statistika výsledků</b>	Ruční záznam.	Ruční záznam.	Součást softwaru.	Součást softwaru.

### Diagnostikování chyb

Zde zmíněné kontrolní metody a systémy, mohou odhalit pouze omezené množství chyb. Množství odhalených chyb je omezeno na použitou kontrolní metodu a systém pro určitou technologii propojení.

U **technologie pájení** je rozumné provádět hned řadu několika kontrol (optickou, elektrickou, klimatickou a mechanickou). Optickou kontrolou (vizuální, AOI) je možné

sledovat strukturu a tvar spojů. Případné chyby jsou dobře viditelné. Zde je omezující pouze množství kontrolovaných zařízení (výrobků), kdy pro vizuální kontrolu je vhodné spíše kusové množství, protože kontrolu provádí pracovníci manuálně. U AOI již vypomáhá pracovníkům počítač, který usnadňuje kontrolu a snižuje časovou náročnost na jeden výrobek. Pomocí elektrických kontrol testujeme funkčnost zařízení, tak aby bylo provozuschopné. Klimatické kontroly pomáhají testovat zařízení na určitý teplotní rozsah, ve kterém mohou zařízení „bezchybně“ pracovat (jde o zkoušky životnosti a spolehlivosti v určitém prostředí). Mechanické kontroly pomáhají zjistit, jaké zatížení zařízení snese. Klimatické a mechanické zkoušky se ovšem využívají pouze na několik výrobků, jde o destruktivní zkoušky. Další výrobky se netestují a předpokládá se, že budou provozuschopné za stejných podmínek. Je vhodné využít optické a elektrické kontrolní metody a systémy, k odhalení možné chyby. Z důvodu vhodné časové a finanční náročnosti tomu tak vždy nebývá.

**Technologie lepení** je rozdílná, zde je rozumné použít především elektrické, mechanické a klimatické kontroly. Veliká pozornost je věnována především elektrické kontrole, která je nejdůležitější. Optickou kontrolou jsou sledovány pouze viditelné chyby (např. značné rozlití lepidla, chybějící součástka, iontová migrace). Nevodivá lepidla se používají převážně zespol součástky na přichycení. Vodivá lepidla jsou umístěna mezi kontaktní plošky a jsou tedy optickou kontrolou hůře sledovatelné. Proto se provádí především elektrické kontroly pro zjištění správné funkčnosti zařízení a mechanické kontroly, pro zjištění správné přilnavosti lepidla při namáhání součástky. Klimatické kontroly pomáhají testovat především teplotní rozsah, kde je zařízení provozuschopné (jde o zkoušky životnosti a spolehlivosti v určitém prostředí). Opět zde platí, že klimatické a mechanické zkoušky jsou destruktivní, a tak se provádí pouze na několika výrobcích. Je proto vhodné z časové a finanční náročnosti použít především elektrické kontroly pro možné odhalení chyb.

U **technologie propojování mikrodrátky** je kladen důraz především na elektrické a mechanické kontroly. Důvod je, že elektrické kontroly zajistí správnou funkčnost, provozuschopnost zařízení. Mechanické kontroly zajistí kvalitní propojení mezi čipem a deskou, tak aby byl co nejlépe stabilní propojovací mikrodrátek, který je důležitý pro funkčnost čipu. Musí být zaručena jeho pevnost a odolnost. Klimatické kontroly opět zaručí funkčnost zařízení v určitém teplotním rozsahu (jde o zkoušky životnosti a spolehlivosti v určitém prostředí). Klimatické a mechanické kontroly jsou opět destruktivní zkoušky a jsou tedy prováděny pouze na výběrových výrobcích. Optické kontroly v případě hustého osazení

čipu vývody jsou velmi náročné a nepraktické z časové náročnosti. Je proto vhodné z časové a finanční náročnosti použít především elektrické kontroly pro odhalení chyb.

## **Závěr**

V části věnované propojovacím strukturám jsem se zaměřil na seznámení a stručný popis uvedených propojovacích struktur. Zaměřil jsem se na jednotlivé kroky, s kterými jsem se setkal za dobu mého studia a v odborné literatuře, a s kterými se můžeme setkat u propojovacích struktur obecně.

V části diagnostikování chyb u propojovacích struktur jsem popsal nejčastěji možné vzniklé chyby při procesu propojování, které mohou nastat v průběhu výrobního procesu. U přehledu aplikovatelných metod diagnostiky chyb jsem se zaměřil na popsání optických a elektrických metod a systémů, které jsou dnes v praxi velmi hojně využívány k zdokonalení výrobního procesu a samotného výrobku. Také je uvedeno v této části bakalářské práce diagnostikování kvality pájených, lepených spojů a spojů vytvořených pomocí mikrodrátku.

V části porovnání diagnostikování chyb jsem zpracoval ucelený přehled o porovnání těchto diagnostických metod, systémů a diagnostikování chyb. Uvedl jsem nejpříznivější stav, který by měl být používán k diagnostikování chyb. Samotné diagnostikování chyb je provedeno pro jednotlivé technologie propojovacích struktur s přihlédnutím k co nejkratší době výroby a co nejmenším nákladům na výrobu. Z tohoto porovnání je zřejmé, že klimatické a mechanické kontroly budou pro všechny výrobky téměř totožné. Důležité jsou elektrické kontroly, které by měly být provedeny u každého zařízení (výrobku) z důvodu správné funkčnosti výrobku. Poslední optické kontroly jsou nejlevnější, ale velmi časově náročné, jestliže se jedná o velký objem výroby.

Nyní kdy je elektronika všudypřítomná a život bez ní je nepředstavitelný, je velice důležité brát ohled především na diagnostiku propojovacích struktur. Důraz je proto kladen na diagnostické kontroly elektrické, životnost a spolehlivost výrobku. Ovšem moderní trend jako je vzrůstající objem výroby, snižování cen nákladů, přesnost výroby, miniaturizace výrobků tomu nepřispívá. Pokud by měly být splněny veškeré podmínky kladené na výrobek (funkčnost, životnost, spolehlivost), byly by kontroly velice časově a finančně náročné. Z tohoto důvodu jsou upřednostňovány (prováděny) kontroly pouze ty nejnutnější, a to převážně elektrické (funkční), tak aby bylo splněno maximální požadované časové a finanční zatížení výroby a výrobek byl plně funkční.

## Použitá literatura

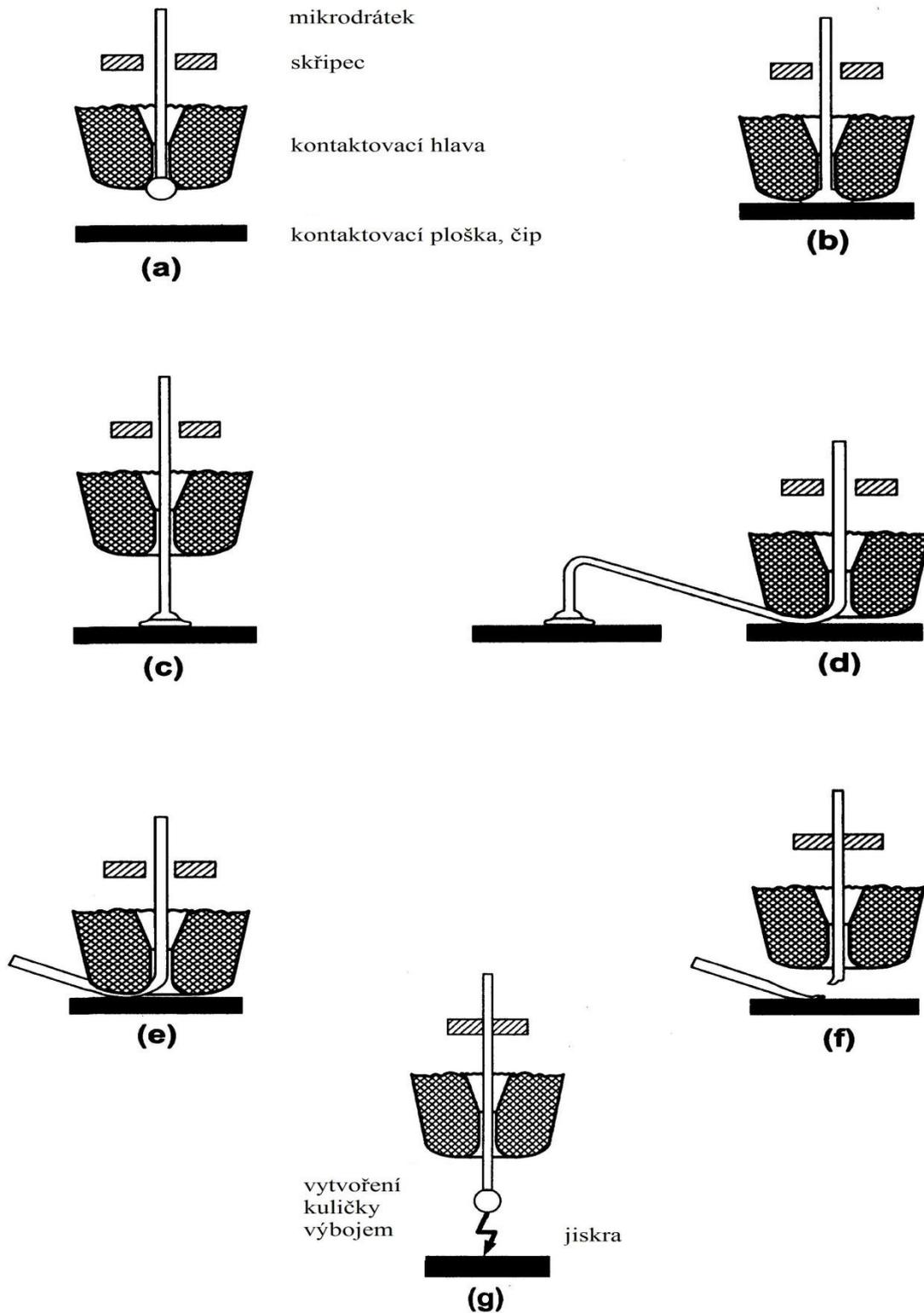
- [1] MACH, Pavel, SKOČIL, Vlastimil, URBÁNEK, Jan. *Montáž v elektronice: Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2001. 440 s. ISBN 80-01-02392-3
- [2] *Rozdělení pájení* [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.ulozto.cz/8269947/13-pajeni-pdf>>
- [3] *Pájení* [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <[http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-t2-02\\_pajeni.pdf](http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-t2-02_pajeni.pdf)>
- [4] *Montáž SMT a THT - pájení: Měkké pájení* [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/pajeni.pdf>>
- [5] HLAVATÝ, Ivo. *Pájení* [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/Vyuka/2009Pajeni.pdf>>
- [6] MATĚJOVSKÝ, Kort'as. *Pájení* [online]. c2011 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <[http://kortas.matejov.org/sites/kortas.matejov.org/files/spe11\\_-\\_pajeni.pdf](http://kortas.matejov.org/sites/kortas.matejov.org/files/spe11_-_pajeni.pdf)>
- [7] MATĚJOVSKÝ, Kort'as. *Technologie pájení* [online]. c2011 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <[http://kortas.matejov.org/sites/kortas.matejov.org/files/spe12\\_-\\_technologie\\_pajeni.pdf](http://kortas.matejov.org/sites/kortas.matejov.org/files/spe12_-_technologie_pajeni.pdf)>
- [8] DRLÍK, Miloš. *Strojní pájení v technologii SMT* [online]. c2004 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <[http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/cv\\_strojni\\_pajeni.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/cv_strojni_pajeni.pdf)>
- [9] *Pájení v elektrotechnice: pájení naměkko* [online]. c2002 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <[http://www.edunet.souepl.cz/~weisz/dilna/e\\_paj/pajpost.php](http://www.edunet.souepl.cz/~weisz/dilna/e_paj/pajpost.php)>
- [10] JONES, Ross. *Lepení v elektronice: Aktuální trend – miniaturizace, krátké technologické doby a vysoké požadavky na bezpečnost* [online]. c2008 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38025.pdf>>
- [11] URBÁNEK, Jan, KLABAČKA, Edvard. *Technologie elektronických zařízení*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997. 159 s. ISBN 80-01-01551-3
- [12] STARÝ, Jiří. *Plošné spoje a povrchová montáž* [online]. [cit. 2012-02-23]. Dostupné z WWW: <[http://files.gamepub.sk/Bakalar/ET1/Plosne\\_spoje\\_a\\_povrchova\\_montaz.pdf](http://files.gamepub.sk/Bakalar/ET1/Plosne_spoje_a_povrchova_montaz.pdf)>
- [13] STEINER, František, HAMÁČEK, Aleš, SKOČIL, Vlastimil, ŠTRUNC, Jiří. *Nové uplatnění lepidel v elektronice: Materiály pro elektroniku a elektrotechniku*. 1. vyd.

- Ostrava : Tanger, 1999. 19-25 s. ISBN 80-85988-29-1
- [14] ABEL, Martin. *SMT Technologie povrchové montáže*. 1. vyd. Pardubice: Platan, 2000. 246 s. ISBN 80-902733-1-9
- [15] MATĚJOVSKÝ, Kort'as. *Kontaktování wire-bonding* [online]. c2011 [cit. 2012-02-25]. Dostupné z WWW: <[http://kortas.matejov.org/sites/kortas.matejov.org/files/spe9\\_-\\_kontaktovani\\_wire\\_bonding.pdf](http://kortas.matejov.org/sites/kortas.matejov.org/files/spe9_-_kontaktovani_wire_bonding.pdf)>
- [16] *Připojování čipů na kontakty základny: Wirebonding (připojování mikrodrážky)* [online]. [cit. 2012-02-26]. Dostupné z WWW: <<http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Kontaktovani%20cipu.pdf>>
- [17] *Polovodičové čipy* [online]. [cit. 2012-02-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2009-BMTS-2-polovodicove-cipy.pdf>>
- [18] SZENDIUCH, Ivan. *Mikroelektronické montážní technologie*. 1. vyd. Brno: VUT, 1997. 237 s. ISBN 80-214-0901-0
- [19] ABEL, Martin, CIMBOUREK, Vladimír. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. 1. vyd. Pardubice : ABE.TEC, 2005. 179 s. ISBN 80-903597-1
- [20] *Pájení: Chyby při pájení* [online]. [cit. 2012-03-02]. Dostupné z WWW: <[http://www.edunet.souepl.cz/EZO/o\\_chyb.htm](http://www.edunet.souepl.cz/EZO/o_chyb.htm)>
- [21] *Propojování v elektronice - elektrické spoje* [online]. [cit. 2012-03-02]. Dostupné z WWW: <[http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/08a\\_propojovani\\_v\\_elektronice.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/08a_propojovani_v_elektronice.pdf)>
- [22] NOVOTNÝ, Marek. *Optimalizace procesu kontaktování CMOS čipů pro vyšší proudové zatížení: doktorská práce* [online]. c2009 [cit. 2012-04-28]. Dostupné z WWW: <[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=19688](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=19688)>
- [23] *Soldering Defects Database* [online]. [cit. 2012-04-25]. Dostupné z WWW: <[http://defectsdatabase.npl.co.uk/defectsdb/defects\\_query.php](http://defectsdatabase.npl.co.uk/defectsdb/defects_query.php)>
- [24] *Automatická optická inspekce (AOI)* [online]. [cit. 2012-03-19]. Dostupné z WWW: <[http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/06a\\_aoi.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/06a_aoi.pdf)>
- [25] KAHLE, Petr, STARÝ, Jiří. *Plošné spoje a povrchová montáž* [online]. [cit. 2012-04-18]. Dostupný z WWW: <[http://www.umel.feec.vutbr.cz/METMEL/studijni%20pomucky/METMEL\\_11\\_SP\\_Plosne\\_spoje\\_a\\_povrchova\\_montaz.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/METMEL/studijni%20pomucky/METMEL_11_SP_Plosne_spoje_a_povrchova_montaz.pdf)>
- [26] *Vizuální kontrola* [online]. [cit. 2012-04-19]. Dostupné z WWW: <[http://www.ndt.cz/prilohy/4/vizualni\\_kontrola.pdf](http://www.ndt.cz/prilohy/4/vizualni_kontrola.pdf)>

- [27] *Kontrola a testování osazených desek s plošnými spoji MDA, In-circuit a funkční testovací systémy: Elektrické metody kontroly osazených desek s plošnými spoji.* [online]. c2007 [cit. 2012-04-19]. Dostupné z WWW: <[http://www.testdps.cz/01\\_MDA/techinfo.htm](http://www.testdps.cz/01_MDA/techinfo.htm)>
- [28] BJALKOV, Pavel. *Vlastnosti vodivých spojů: bakalářská práce* [online]. [cit. 2012-04-28]. Dostupné z WWW: <[http://theses.cz/id/at9jr2/Vlastnosti\\_vodivch\\_spoj.pdf](http://theses.cz/id/at9jr2/Vlastnosti_vodivch_spoj.pdf)>
- [29] *Gaiser precision bonding tool: Wedge Bonding, Wedge-Wedge Ultrasonic Bonding* [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.gaisertool.com/catalog/4.pdf>>
- [30] *Gaiser precision bonding tool: Capillary Wire Bonding , The Ball Bonding Process* [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.gaisertool.com/catalog/2.pdf>>

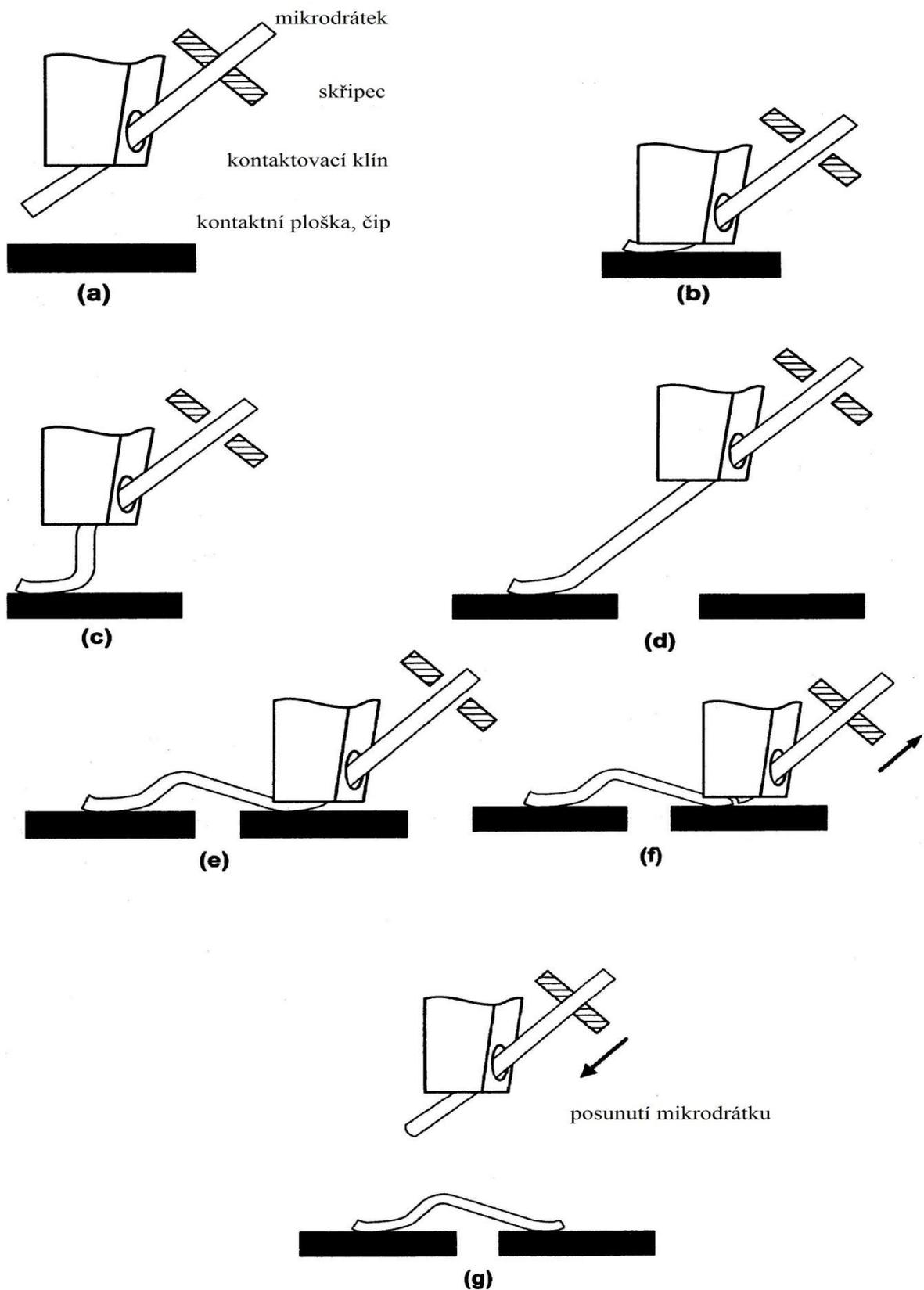
## Přílohy

Příloha 1 - Postupné technologické kroky při kontaktování na kuličku.



Obr. 53 a) připravená kulička pro kontaktování; b) přichycení kuličky k čipu; c) tažení mikrodrátku; d) přetažení mikrodrátku ke kontaktní plošce; e) přichycení mikrodrátku; f) odtržení mikrodrátku; g) vytvoření nové kuličky (zdroj: [1])

**Příloha 2 - Postupné technologické kroky při kontaktování hranou.**



Obr. 54 a) mikrodrátek připravený pro připojení; b) připojení mikrodrátku k čipu; c) nakontaktovaný čip; d) tažení mikrodrátku ke kontaktní plošce; e) připojení mikrodrátku ke kontaktní plošce; f) odtržení mikrodrátku; g) posunutí mikrodrátku; (zdroj: [1])