

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Testování desek plošných spojů**

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

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

Jméno a příjmení: Lukáš MERGL  
Osobní číslo: E11B0058P  
Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Elektrotechnika a energetika  
Název tématu: Testování desek plošných spojů  
Zadávací katedra: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

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

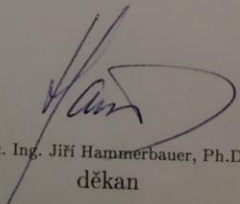
1. Popište postup výroby desky plošného spoje.
2. Definujte nejčastější vady, které vznikají při výrobě a analyzujte jejich příčiny.
3. Popište druhy kontrol a testování desek plošných spojů.
4. Zhodnoťte aktuální stav průběhu kontroly desek plošných spojů vybrané firmy.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

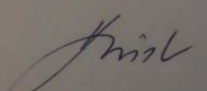
1. Mach, P., Skočil, V., Urbánek, J.: Montáž v elektronice, ČVUT Praha 2001, ISBN 80-01-02392-3
2. IPC-A-600H: Acceptability of Printed Boards, 2010, ISBN 1-58098629-3
3. IPC- TM-650H: Test methods manual, 2009, ISBN 1-580981-38-0
4. Internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tomáš Řeřicha, Ph.D.  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013  
Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na výrobu a testování jednovrstvých desek plošných spojů. V bakalářské práci jsou uvedeny nejčastější možné vady na deskách plošných spojů a jejich možné kontroly.

## **Klíčová slova**

Desky plošných spojů, výroba desek plošných spojů, kontroly desek plošných spojů, vady desek plošných spojů,

**Abstract**

The master thesis is focused on testing and production of single-layer printed circuit boards. There are some common possible defects in circuit boards and their potential controls.

**Key words**

Printed circuit boards, production of printed circuit boards, printed circuit boards inspection, defects of printed circuit boards.

## Prohlášení

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

.....

podpis

V Plzni dne 9.6.2014

Lukáš Mergl

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval firmě PULS, hlavně panu Ing. Pavlu Hanzlíkovi, za cenné rady, připomínky a vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1 POSTUP VÝROBY DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ</b> .....	<b>2</b>
1.1 ÚVOD, ZHODNOCENÍ STAVU TRHU: .....	2
1.2 MATERIÁLY K VÝROBĚ DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ: .....	2
1.2.1 Výztuž .....	2
1.2.2 Pojivo .....	3
1.2.3 Typy výsledných laminátů .....	3
1.2.4 Měď .....	4
1.2.5 Pokovení .....	4
1.3 VÝROBNÍ PROCES DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ: .....	5
1.3.1 Dělení základního materiálu .....	5
1.3.2 Laminace .....	5
1.3.3 Vrtání .....	5
1.3.4 Čištění a kartáčování .....	7
1.3.5 Fotorezist .....	7
1.3.6 Leptání .....	8
1.3.7 Nepájivá maska .....	9
1.3.8 Konečné úpravy povrchu .....	9
1.3.9 Celkové shrnutí výroby .....	10
<b>2 DRUHY VAD V DESKÁCH PLOŠNÝCH SPOJŮ</b> .....	<b>11</b>
2.1 PŘÍTOMNOST NEČISTOT V DESCE .....	12
2.2 SOUOSOST DĚR .....	13
2.3 ADHEZE NEPÁJIVÉ MASKY .....	14
2.4 ROVINNOST .....	15
2.5 CHYBY V OTVORECH .....	16
2.5.1 Etchback .....	16
2.5.2 Nedostatečná vrstva koloidu „Desmear“ .....	17
2.6 PODLEPTÁNÍ .....	18
<b>3 KONTROLY DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ U VÝROBCE</b> .....	<b>19</b>
3.1 AOI + VIZUÁLNÍ TESTOVÁNÍ DLE ROZMĚROVÝCH VÝKRESŮ .....	19
3.2 LÉTAJÍCÍ SONDA (FLYING PROBE) TESTY .....	20
3.3 KONTROLNÍ VÝBRUSY .....	20
3.4 NEDESTRUKTIVNÍ TESTY U ODBĚRATELE .....	21
3.4.1 Test lepicí páskou – tape test .....	22
3.5 ZKOUŠKY VE FIRMĚ PULS .....	22
<b>4 ZÁVĚR</b> .....	<b>24</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>26</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>27</b>



## Úvod

Těžko si lze dnes představit svět bez elektrické energie a bez všech elektronických zařízení, které člověku usnadňují a zlepšují život v mnoha směrech. Základním stavebním kamenem těchto elektronických zařízení jsou desky plošných spojů, které díky technologickému pokroku a zkvalitňování výroby umožňují stále větší miniaturizaci zařízení. Tomu, aby se stále využívaly, jim dopomáhá relativně snadná a levná výroba. Popíše zde proces výroby jednovrstvých desek plošných spojů, a to subtraktivní metodou pattern plating aplikovanou na neohebných deskách.

Text je rozdělen do tří částí. První kapitola je rozdělena na dvě podkapitoly, první se zabývá materiály na výrobu samotné desky plošných spojů, jako jsou pojivo, výztuž a pokovovací měď, ale i způsoby pokovení desky mědí. Druhá podkapitola se zabývá výrobou desek plošných spojů a vysvětluje jednotlivé operační kroky od počátku procesu, od vstupu desky do firmy až po její případné osazení nebo vyexpedování k jiné firmě k dalšímu zpracování. Druhá kapitola uvádí druhy chyb, které mohou nastat při výrobě, jako jsou například špatná adheze nepájivé masky nebo chyby v otvorech vlivem špatného vrtání. Také se zabývá chybami při převozu a skladování, jako je problém s rovinností, který často nastává při nesprávném transportu nebo skladování desek. Třetí část popisuje základní kontroly desek plošných, a to jak optické, tak elektrické, také řeší, jak desky kontrolují dodavatelé (výrobci desek) a odběratelé (osazovny).

# 1 Postup výroby desek plošných spojů

## 1.1 Úvod, zhodnocení stavu trhu:

Dnešní desky plošných spojů se průmyslově vyrábějí především v Číně. V Evropě a Americe se specializují na vývoj desek k novým aplikacím a na návrh nových materiálů, které splňují požadavky zadavatelů. V těchto zemích jsou to hlavně menší zakázky, ale požadavkem je, aby byly vyrobeny na technologicky co možná nejvyšší úrovni a za co nejkratší dobu (nejlépe do druhého dne).

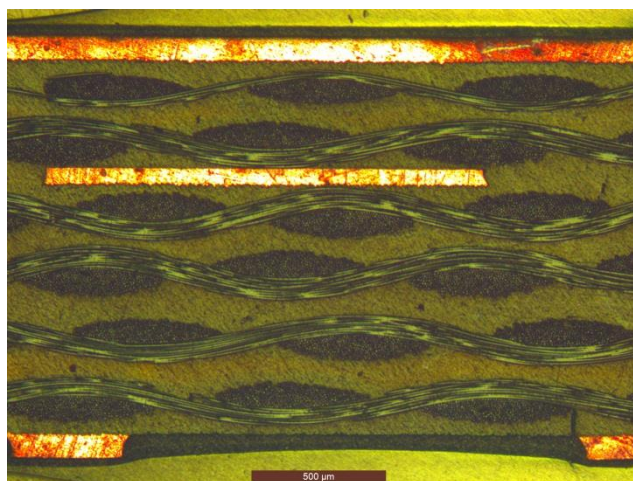
## 1.2 Materiály k výrobě desek plošných spojů:

Laminát se skládá z výztuže a pojiva. Na tento laminát se nanáší měď a tato deska se dále opracovává do výsledné podoby.

### 1.2.1 Výztuž

Výztuž určuje jak mechanické vlastnosti desky (tvrdost, ohebnost atp.), tak elektrické (elektrická pevnost) nebo chemické či teplotní vlastnosti. Tato výztuž tvoří „kostru“ výsledného laminátu. <sup>[1]</sup>

Dnes se pro výztuž používají především skleněná vlákna (skvělý poměr vlastností a ceny). Výztuž může být také z jiných materiálů, například z tvrzeného papíru (levnější) nebo z různých druhů jiných vláken (křemenných, uhlíkových atd.). Tato výztuž se proplétá, jako by se proplétala síť nebo vlákna nitě v látce. Toto se dělá z důvodu lepších mechanických vlastností po celé ploše desky.



Obr. 1 Propletené svazky skleněných vláken

### 1.2.2 Pojivo

Pojivo musí mít vysokou dielektrickou pevnost a zároveň malou relativní permeabilitu. Zároveň by mělo mít dobré tepelné a chemické vlastnosti. Většinou se musí nejdříve vytvrdit (teplotou), aby bylo pevné => používají se reaktoplastové pryskyřice nebo termoplasty pro dobré mechanické vlastnosti po vytvrzení. Většina používaných pojiv jsou hydrofilní a absorbují vlhkost, čemuž se musí předcházet (např. umístěním desky při přepravě do obalů nepropouštějící vlhkost, anebo udržováním vlhkosti a čistoty prostředí při výrobě desky). Jinak se dielektrické vlastnosti desky zhoršují. <sup>[1]</sup>

Epoxidové pryskyřice se používají pro dobré teplotní, mechanické a chemické vlastnosti. Do pryskyřice se přidávají aditiva, která ovlivňují její vlastnosti (například teplotu skelného přechodu nebo součinitel teplotní roztažnosti), jež se dají upravit dle jejího použití. <sup>[1]</sup>

### 1.2.3 Typy výsledných laminátů

Existuje 5 základních druhů:

- FR1 – papír s fenolovou pryskyřicí – levnější provedení
- FR2 – papír s fenolovou pryskyřicí
- FR3 – papír s epoxidovou pryskyřicí
- FR4 – skelná tkanina s epoxidovou pryskyřicí – nejběžnější druh desek plošných spojů
- FR5 – skelná tkanina s epoxidovou pryskyřicí – zvýšená teplotní odolnost

(zkratka „FR“ znamená „fire retardant“, což v překladu znamená látka, která zabraňuje nebo zpomaluje hoření)

Kompozitní materiály: více materiálů výztuže (kombinace skelné tkaniny, skelné rohože a papíru)

CEM-1

- jádrem papír a krycími vrstvami skelná tkanina
- vlastnosti mezi FR4 a FR3
- cena: 2/3 z ceny FR4

### 1.2.4 Měď

Jako vodivé propojení mezi součástkami se používá měděná vrstva. Na povrch desky se nanáší elektrolyticky. Tato měděná folie může být nanášena z jedné strany nebo z obou stran, v případech vícevrstevných desek může být i uvnitř desky.

Tyto folie se vyrábějí s velmi vysokou čistotou, ta činí minimálně 99,85% obsahu mědi, a to proto, aby byla zaručena co možná nejlepší vodivost, tedy co možná nejmenší rezistivita. <sup>[1]</sup>

Vytvářejí se i různé tloušťky folie:

- standardní folie
  - 18  $\mu\text{m}$  (0,5 oz)
  - 35  $\mu\text{m}$  (1 oz = 28,3g/ft<sup>2</sup>)
  - 70  $\mu\text{m}$  (1,5 oz)
  - 105  $\mu\text{m}$  (3 oz)
- tenké folie
  - 7  $\mu\text{m}$
  - 9  $\mu\text{m}$

Pozn.: V praxi se dost často plátování mědi popisuje v imperiálních jednotkách:

- oz = unce = 28,3 g
- ft = stopa = 30,5 cm

### 1.2.5 Pokovení

desky lze pokovit dvěma způsoby:

- a) chemicky
- b) galvanicky

*chemické pokovení:* nanášení vrstvy vodivého materiálu bez přítomnosti elektrického proudu (Cu, Ni AU aj.)

*galvanické pokovení:* nanášení vrstvy vodivého materiálu z pokovovacího roztoku průchodem elektrického proudu (Cu, Sn, Ni, Au aj.). Používá se stejnosměrný proud, rychlost pokovení je úměrná velikosti tohoto proudu. U desek plošných spojů většinou chceme také pokovené vnitřní části otvorů, a jelikož je samotná deska nevodivá, musí se na ni nejprve nanést vodivá vrstva, aby bylo možno galvanicky nanést měď. Toho se docílí tak, že se na vnitřní strany otvoru nanese tenká vrstvička vodivého materiálu (grafit, koloid, ~1  $\mu\text{m}$ ) a na něj se již galvanicky navazuje vodivý materiál – typicky měď. Proces je plně automatizován.

## 1.3 Výrobní proces desky plošných spojů:

### 1.3.1 Dělení základního materiálu

Jelikož se základní materiál desky dodává ve velkých rozměrech (okolo 1 m<sup>2</sup>), musí se nařezat na menší kusy, protože zpracovávat tak velký kus desky by bylo velice náročné. Desky plošných spojů se používají pro různé aplikace, proto i jejich tvar se s každou aplikací mění, avšak nelze opracovávat každou desku zvlášť. Proto je zvolen kompromis, že se jeden velký plát desky rozdělí na menší přířezy, na které se vejde více desek a s těmi se poté ve výrobě operuje. Toto rozdělení se provádí buďto vodním řezáním, nebo drážkováním a poté odlomením desky nebo stříháním elektrickými nůžkami.

Řezání vodním paprskem se docílí výsledného tvaru, nebo jen vyhotovení přířezů. Elektrickými nůžkami se původní desky upravují na jednotlivé přířezy nebo do konečných rozměrů. Výsledný přířez může být naskládán s dalšími přířezy pro vytvoření vícevrstvé desky plošných spojů.

### 1.3.2 Laminace

Laminátu, který odizolovává jednotlivé vodivé vrstvy mezi sebou, se též říká „prepreg“. Je to neúplně vytvrzený základní materiál o tloušťce od 0,05 až 0,18 mm, jehož vytvrzení proběhne až při stavu laminace čili za vysoké teploty a tlaku.

Vysoká teplota je užívána proto, aby se epoxid v prepregu dokonale roztekl a zaplnil v něm veškerá volná místa. Poté zesklotaví, vytvrdí se a získá požadované vlastnosti: Je to nevratný proces. Laminuje se za teploty 185 °C. Vysoký tlak dopomáhá zatékání epoxidu do těžkozatekatelných míst. Působí se tlakem 16 kg/cm<sup>2</sup>.

### 1.3.3 Vrtání

Vrtat otvory u desek plošných spojů lze různými způsoby, např. mechanickými vrtáky, či laserem.

Mechanické vrtání probíhá za velmi vysokých otáček (30–300 tisíc otáček za minutu). Proto u těchto vrtaček bývají často použita vzduchová ložiska. Používají se NC nebo CNC vícevřetenové vrtačky pro rychlejší výrobu desek. Deska se ve vrtačce musí samozřejmě upnout, aby nedošlo k samovolnému pohybu.

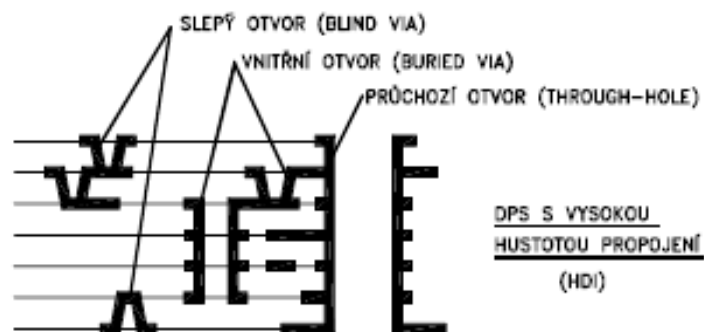
Vrtají se různé průměry s ohledem na další opracování desky (chceme-li prokovit otvor, musíme vyvrtat díru o něco větší, než je předepsaná velikost). Nejmenší možná velikost děr vytvořených vrtáním je okolo 0,1 mm, maximální velikost děr je v podstatě neomezena. Typická hodnota rychlosti vrtání otvorů se pohybuje mezi 2 000 až 5 000 otvorů/h. Výrobci uvádějí, že by se životnost vrtáku měla pohybovat okolo 2 000 otvorů a u některých vrtáků se uvádí, kolikrát lze vrták nabrousit, aby svou funkci plnil správně. <sup>[1]</sup>

Laserové systémy pro vyhotovení otvorů obsahují typicky dva laserové systémy: UV laser pro realizaci otvorů v kovových vrstvách a CO<sub>2</sub> laser pro zhotovení otvorů v dielektrických vrstvách. Výsledkem je velmi přesné zhotovení děr s malými odchylkami ( $\pm 25 \mu\text{m}$ ). Avšak při tom jsou kladeny velké nároky na pracovní prostředí (ohledně vlhkosti, teploty nebo odsávání vzduchu). Laserové vrtání má oproti mechanickému tu nevýhodu, že výsledná díra má kónický tvar, který je nejširší na povrchu desky a postupně se zužuje směrem vrtání. Laserové vrtání má tu výhodu, že dokáže vytvořit menší průměry než vrtání mechanické. Otvory s průměrem pod 150  $\mu\text{m}$  se označují jako microvia.

Otvory se dají dělit na součástkové a propojovací. Součástkové jsou určeny pro vývod součástek a jejich zapájení do desky. Propojovací jsou určeny k propojení jednotlivých vrstev mezi sebou, často jsou prokoveny nebo vyplněny vodivým materiálem. <sup>[1]</sup>

Propojovací otvory lze dělit na tři základní typy:

- slepé
- vnitřní (skryté)
- průchozí



Obr. 2 Druhy děr (vícevrstvá deska)

Slepé otvory nejčastěji fungují jako propojení mezi povrchovou vrstvou desky a vrstvou pod touto vrstvou. Vnitřní otvory propojují vrstvy uvnitř desky.

### 1.3.4 Čištění a kartáčování

Během manipulace s deskou dojde často k jejímu zašpinění. Tyto nečistoty jsou pouhým okem neviditelné, avšak mohou mít špatný dopad na další práci s deskou a na kvalitu desky. Proto se deska musí čistit, nejčastěji se k tomu používají proud vody a rotující kartáče.

Nejen kvůli mastnotě a jiným se deska čistí a kartáčuje. Například chceme-li nanést cokoli na měděnou vrstvu, půjde to jen velmi obtížně, jelikož měděná vrstva je téměř dokonale rovinná a nic se na ní jen tak neuchytí. Proto se zdrsňuje povrch mědi, aby se s ním dalo lépe pracovat. Někdy se po kartáčování měď ještě trochu naleptá, aby výsledný povrch byl mnohonásobně větší a přilnavost materiálu k mědi velmi dobrá.

### 1.3.5 Fotorezist

Fotorezist je látka, která změní své vlastnosti za působení UV záření o správné vlnové délce. Používá se, aby zakryté části desky ochránil před leptáním nebo pocínováním.

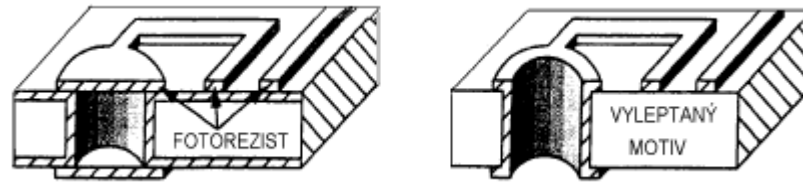
Fotorezist lze dělit na:

- pozitivní – zářením se rozruší jeho struktura a poté se odplaví,
- negativní – zářením na něj se jeho struktura zpolymeruje a kryje dané oblasti, tento typ se používá častěji. <sup>[1]</sup>

Na desku se fotorezist nanáší technikou laminace: Nalaminuje se přímo na desku, tlak přitom působí jen po určitý časový interval. Zařízením, kterým laminujeme fotorezist na desku, může být lis nebo jím mohou být dva proti sobě otáčející se válce. Lze laminovat ve vakuu nebo za zvýšené teploty.

Fotorezist lze také dělit na to, v jakém stavu je před nanesením na samotnou desku: Je buď ve stavu kapalném, nebo ve stavu tuhém.

Odstranění fotorezistu se také nazývá „stripování“. Provádí se v roztoku KOH (hydroxid draselný).



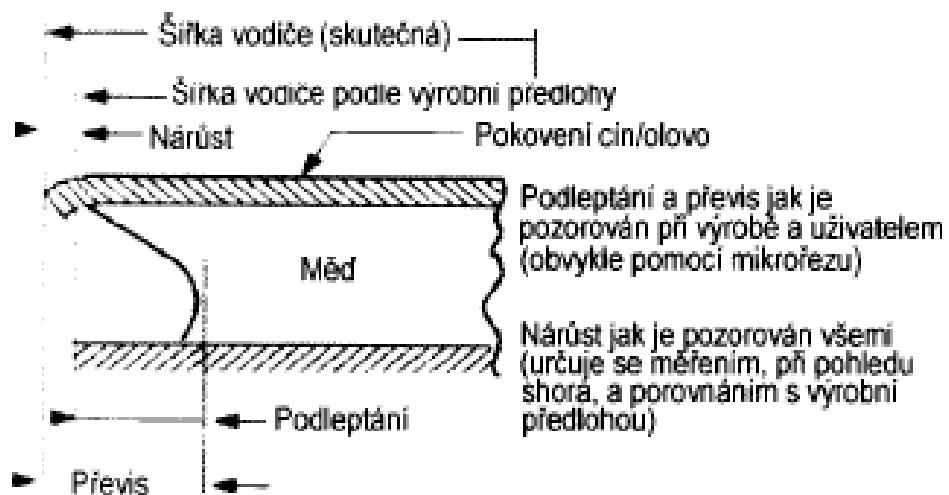
Obr. 3 Vyleptání obrazce na povrch desky (metoda pattern plating)

### 1.3.6 Leptání

Leptání je chemické odstraňování galvanické vrstvy (mědi), která není pokryta leptoodolným materiálem. Pro každou leptoodolnou vrstvu (cín nebo fotorezist) se musí zvolit jiné leptadlo. <sup>[1]</sup>

Nejčastěji se k odleptání používá amoniakální síranová lázeň a čpavek. Z ekologických i ekonomických důvodů se používá regenerace leptacího roztoku a zpětné získávání mědi. <sup>[1]</sup>

Nejčastější vadou v tomto procesu je podleptání mědi. Velikost podleptání závisí například na době leptání, tloušťce mědi, typu leptoodlné vrstvy. <sup>[1]</sup>



Obr. 4. Podleptání mědi



### 1.3.7 Nepájivá maska

Slouží hlavně jako ochranná izolační vrstva elektrických spojů, minimalizuje cínové můstky (elektrické zkraty) po cínování, má tedy podobné vlastnosti jako fotorezist. Slouží také pro lepší optickou kontrolu desky a chrání desku před mechanickým poškrábáním. Tato maska může mít jakoukoli barvu (nejčastěji zelená) a lze na ní tisknout jakýkoli motiv, nejčastěji je to osazení desky.

Existují tekuté i tuhé nepájivé masky. Tekuté nepájivé masky je možnost nanést na desku více způsoby, a to buďto sítotiskem, nebo vyvoláním podobně jako u fotorezistu. Kdežto tuhá nepájivá maska se nanáší laminováním ve vakuu, to proto, aby nevznikaly vzduchové bubliny. <sup>[1]</sup>

Sítotisk je levný a vhodný pro velké série. Spočívá v tom, že se barva nanáší přes síto s motivem.

Fotocitlivé nepájivé masky procházejí podobným procesem jako fotorezist: Výsledný obrazec se získá naexponováním, vyvoláním a následným vytvrzením. Nanáší se na desku buďto clonou, elektrostaticky, nebo sítotiskem (přes prázdňé síto).

### 1.3.8 Konečné úpravy povrchu

HAL (hot air leveling) je žárové nanášení pájky, je to základní povrchová úprava. Předupravená deska se ponoří do roztavené pájky Sn96.5Ag3Cu0.5 (odstoupilo se od olovnatého pájení), vyjme se ven a přebytečná pájka je odstraněna horkým vzduchem. Pájka slouží jako ochrana mědi před oxidací. Výhodou této metody je velmi dobrá pájitelnost. Jejimi nevýhodami jsou nedokonalá rovinnost ploch, energetická náročnost procesu a velké tepelné namáhání desky. <sup>[1]</sup>

OSP je chemická metoda nanášení inhibitorů oxidace mědi na povrch desky s odhalenými měděnými částmi, zpravidla až po nanesení nepájivé masky. Jejimi výhodami je dobrá rovinnost a levnost, je až o 50 % levnější než HAL. Hlavní nevýhodou metody je krátká doba garantované skladovatelnosti. <sup>[1]</sup>

Další možné konečné úpravy povrchu:

- chemické zlacení
- chemické cínování
- galvanické zlacení

### 1.3.9 Celkové shrnutí výroby

- 1) Dělení základního materiálu
- 2) Vrtání
- 3) Kartáčování
- 4) Zvodivění otvorů
- 5) Nanesení fotorezistu
- 6) Osvit a vyvolání fotorezistu
- 7) Odplavení fotorezistu
- 8) Leptání mědi (leptá se až na laminát)
- 9) Odstranění zbytku fotorezistu
- 10) Nanesení nepájkivé masky
- 11) Konečná úprava povrchu (HAL...)
- 12) Potisk nepájkivé vrstvy
- 13) Elektrická a optická kontrola
- 14) Expedice

## **2 Druhy vad v deskách plošných spojů**

Vad se v deskách plošných spojů může vyskytnout mnoho. Proto uvedu jen ty nejčastější vady, se kterými je možno se v průmyslu setkat. K vadám nemusí vždy dojít při výrobě desky, i když to bývá nejčastější. Může k nim dojít i během transportu desek z místa na místo. Jak jsem již uvedl, většina desek se vyrábí v Asii, a proto, osazují-li se například v Evropě, musí se s nimi správně zacházet, aby jejich převoz z místa na místo nebyl pro desku destruktivní.

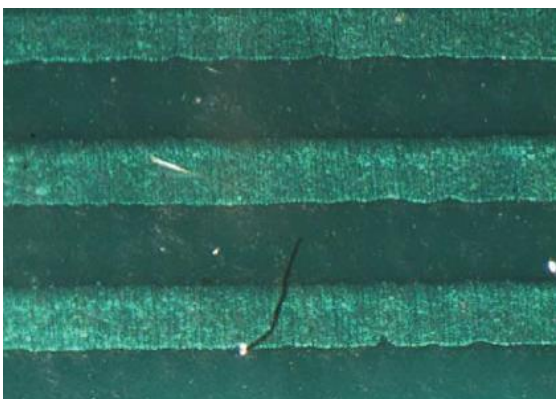
## 2.1 Přítomnost nečistot v desce

Nečistoty mohou být ukryty pod izolačním materiálem. Tyto nečistoty se mohou vyskytovat na čistém laminátu (např. ve vnitřních vrstvách), ale i pod nepájivou maskou. Nečistoty mohou být vodivé nebo nevodivé, organické nebo anorganické, kovové nebo nekovové, avšak v žádném případě nesmějí vlastnosti a funkci desky ovlivnit. O tom, jestli je deska s nečistotami vyhovující, nebo nevyhovující, se rozhoduje na základě velikosti a umístění nečistot. Nečistoty se k desce nejčastěji dostanou špatným, nebo vůbec žádným omytím během jednotlivých výrobních operací, anebo při zpracování v nedokonale čistém prostředí.



Obr. 5 Přijatelné nečistoty v desce

Nečistoty se v desce mohou vyskytovat, jestliže nijak neovlivňují vzdálenost mezi vodiči. Například když nesníží vzdálenost mezi nimi pod menší hodnotu, než je hodnota minimální dovolená, což by jinak mohlo vyvolat zkrat mezi vodiči. A samozřejmě tyto nečistoty nesmějí nijak ovlivnit další možné požadované elektrické vlastnosti desky. <sup>[2]</sup>



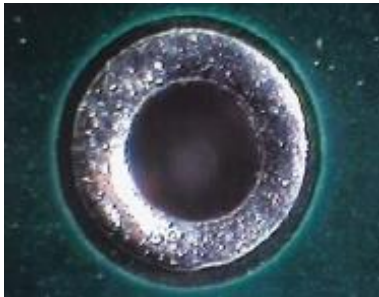
Obr. 6 Nepřípustné nečistoty v desce

Je-li nečistota průhledná, deska může být použita.

Vyskytuje-li se neprůhledná nečistota v desce, nesmí vodivé propojení v desce překrývat, ani se jich dotýkat. <sup>[2]</sup>

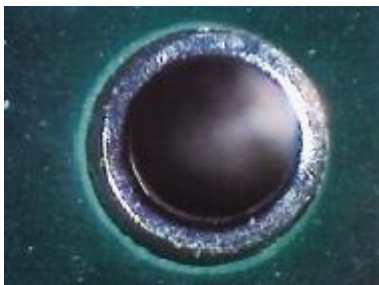
## 2.2 Sousost děr

Chceme, aby díra byla s dírou v nepájitelné masce pokud možno co nejvíce sousobá a aby odstupy mezi mědí a maskou byly nominální.



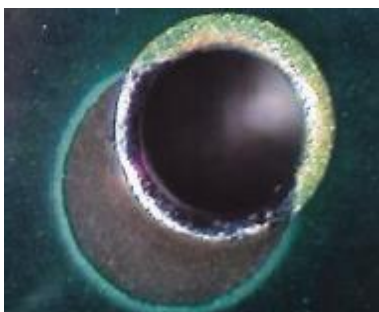
Takto by měla vypadat ideální sousost děr. Osa díry v laminátu se shoduje s osou díry v nepájitelné masce.<sup>[2]</sup>

Obr. 7 Požadovaná sousost otvorů



Toto je ještě přijatelná nesousost, při níž nepájivá maska ještě nepřekrývá minimální hodnotu velikosti pájecího kruhu otvoru, přičemž sousední vodivé části nesmějí být odhaleny.<sup>[2]</sup>

Obr. 8 Přijatelná sousost otvorů



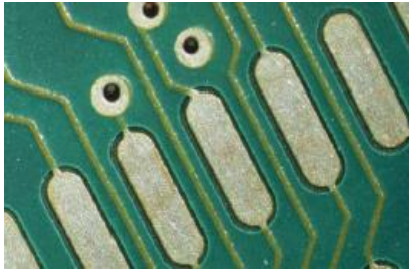
Je-li nesousost tak velká, že nepájivá maska zasahuje do pájecího kruhu, nebo dokonce do díry zasahuje, desku nelze označit za správně vyrobenou.<sup>[2]</sup> Tato vada by způsobila, že by se kontakt správně nepájel na celý povrch pájecího kruhu.

Obr. 9 Nepřijatelná sousost otvorů

Tento požadavek se netýká pouze nepájivé masky a děr, pravidlo lze uplatnit i na nesousost vrstev (u vícevrstvých) pod sebou, které po tomto zjištění musejí být zkontrolovány. Kontrola obsahuje splnění požadavků na všechny elektrické vlastnosti a také, jak rozsáhlé je posunutí vrstev vůči sobě (zda na sebe navazují díry, jestli je někde vodivé přerušení atp.). Rovněž to také mohou být chybně umístěná nepájivá maska a pájecí ploška. I v tomto případě platí obdobné pravidlo jako u nesousosti děr: Nepájivá maska nesmí odhalovat sousední vodivé plochy ani vodiče a nesmí v ní být žádné neoprávněné zásahy (když se ji někdo snažil odstranit např. nožem).

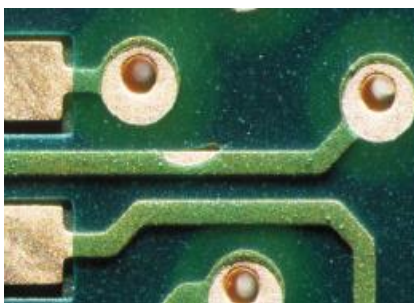
### 2.3 Adheze nepájivé masky

Když nanášíme nepájivou masku, chceme, aby dokonale a pevně přilnula k povrchu desky, avšak může se stát, že se tak nestane, ať už z důvodu nedostatečného vysušení desky, nebo nedostatečné kvality procesu nanášení nepájivé masky. Pro přijatelnost desky musí nepájivá maska dobře a pevně přiléhat k povrchu desky. Nikde nesmějí být vidět ani náznaky jakéhokoli nadzvedávání vrstvy nepájivé masky.



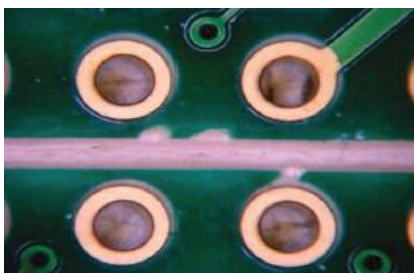
Lze vidět, že nikde nejsou žádné známky odlepování nepájivé masky od desky a nepájivá maska je pevně a těsně připojena k desce. <sup>[2]</sup>

Obr. 10 Cílená adheze nepájivé masky



Deska je přijatelná, jestliže se odlupuje jen část nepájivé masky z povrchu desky nebo z povrchu vodivého spojení a je-li zbytek nepájivé masky pevně a správně spojen s deskou. A jestliže toto odlupování neodhaluje sousední vodivé části, lze desku také prohlásit za přijatelnou. (Neplatí při dodržování normy IPC-A-6010). <sup>[2]</sup>

Obr. 11 Přijatelná adheze nepájivé masky



Lze vidět, že se nepájivá maska odlupuje od desky, čímž obnažuje desku samotnou, což z důvodů změny elektrických vlastností (z hlediska elektrické pevnosti je možný el. přeskok) nebo například pájení (je možné nechtěné vodivé spojení mezi vodivými cestami) není přijatelné.

Obr. 12 a) Nepřijatelná adheze nepájivé masky

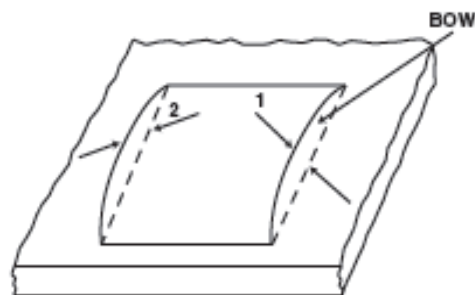


V nepájivé masce nemohou být ani vlnky, které by mohly vytvořit vodivé můstky mezi vodivými propojeními pod nepájivou maskou. Také nesmí klesnout hodnota tloušťky nepájivé masky pod dovolenou mez.

Obr. 12 b) Nepřijatelná adheze nepájivé masky

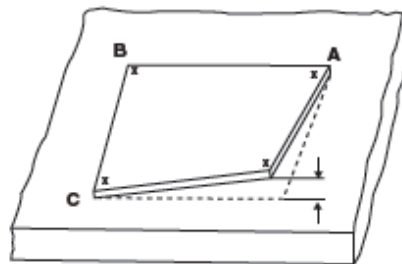
## 2.4 Rovinnost

Chceme-li vytvořit desku plošných spojů, musí být i rozměrově přesná, avšak to se během tepelných procesů, jako je např. laminace, může změnit a deska se může prohnut, nebo dokonce ohýbat a kroutit. Nemusí se tak stát pouze během tepelných procesů, může se tak stát během dopravy desky, kdy na desku spadne jiný objekt (nebo jiný balík desek), nebo během skladování desky, kdy se na desku naloží další materiál.



Obr. 13 a) Prohýbání desky

Jakmile síla působila na 2 strany situované proti sobě, bude deska prohnuta. Jestliže deska bude používat SMD součástky, je dovoleno, aby prohnutí bylo pouze do hodnoty 0,75 % nebo menší. Nebudeme-li používat SMD techniku, je dovoleno, aby prohnutí bylo od 1,5 % a méně. <sup>[2]</sup>



Obr. 14 b) Zkroucení desky

Jakmile síla působila jen na jednu stranu desky (resp. jeden roh), tento roh bude ohnut. Platí ta samá norma (i číselné hodnoty) jako u průhybu desek. Kdybychom chtěli zkroucenou desku opracovávat, mohlo by se stát, že by nezapadala do dalších přípravků při výrobě, nebo přímo do krytu zařízení, který chrání desku a součástky.

## 2.5 Chyby v otvorech

### 2.5.1 Etchback

Aby ušetřily a nemusely zastavovat výrobu kvůli opotřebení a výměně vrtáku na vrtačce, firmy často překračují životnost vrtáků. Tím však na kvalitě velmi ztrácí otvor samotný, a jelikož vrták není tak ostrý, nevrta dobře a nejenže potrhá vlákna místo provrtání, ale také si cestu protlačí hrubou silou místo provrtání. To má za následek špatné rozměry otvorů a hlavně vysokou hodnotu drsnosti povrchu v otvoru. Toto zpřetrhání vláken a změna drsnosti povrchu v otvoru způsobí také to, že se koloid, a tedy na koloid nanesená měď, dostane hluboko do desky na místa, kde nemá vůbec být, což ovlivňuje (snižuje) elektrickou pevnost desky atp.



Lze vidět, že díra byla správně vyvrtána a že okraje mají správnou drsnost. Tudíž koloid, a tedy i měď, zůstala pouze v otvoru a nezatékala nikam hlouběji do desky. Vše je proto správně uděláno a deska může být použita ve výrobě.

Obr. 15 Správně vyvrtaná díra bez „etchback“ jevu



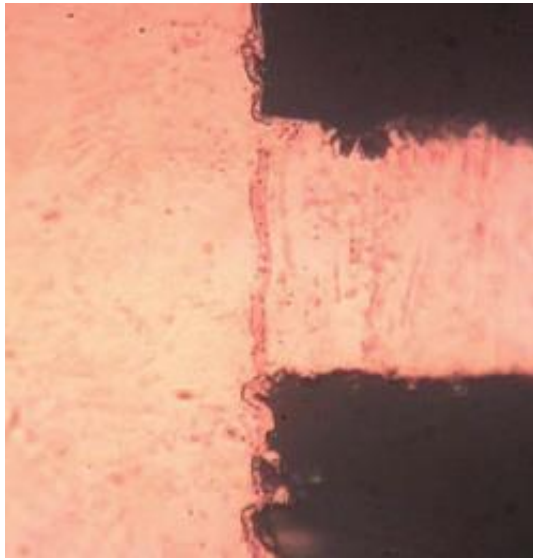
Lze vidět, že díra nebyla vyvrtána správně a že měď se dostává hluboko do desky, do míst, kde nemá vůbec být, a může tak ovlivnit elektrické vlastnosti desky (např. elektrickou pevnost).

Obr. 16 „Etchback“ jev při špatném vyvrtání otvoru



## 2.5.2 Nedostatečná vrstva koloidu „Desmear“

Koloid se nanáší na vnitřní povrch otvoru, aby v něm mohlo dojít ke galvanickému pokovení, nanáší se velmi tenká vrstva jen pro zvodivění nevodivých částí. Koloid je kapalina s vysokým obsahovým procentem grafitu proto, aby byl vodivý. Jakmile se tohoto koloidu nanese až příliš malé množství, může se stát, že se na něj bude hůře nakovovat měď, a tudíž spoj mezi vodivou vrstvou na desce a mezi pokovením otvoru nemusí být tak kvalitní. To by znamenalo zvýšení odporu v daném místě, což znamená vyšší teplotu a tepelné namáhání, a tedy možnou obloukovou činnost a vyhoření desky v daném místě.



Je vidět, že měď se dobře nakovila na koloid a vnitřní povrch otvoru a že vodivé propojení mezi vodivou vrstvou mědi na desce a mědi v otvoru je kvalitní a úplné.

Obr. 17 Dobrý propoj mezi vodivou vrstvou desky a pokovením otvoru



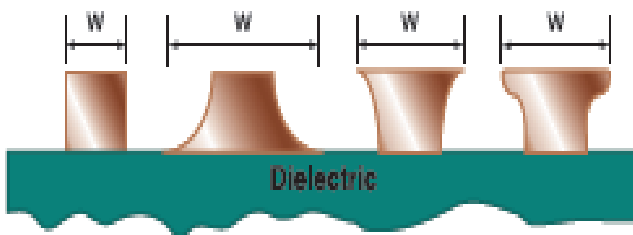
Lze vidět, že se měď v otvoru nespojila s vodivým propojením desky, což je nepřijatelné.

Dle normy IPC-A-600 nesmí být zmizení koloidu oproti rovině otvoru (bez nakovené mědi) větší než 0,025 mm. <sup>[2]</sup>

Obr. 18 Nepropojení mezi vodivou vrstvou desky a pokovením otvoru, které je nepřijatelné.

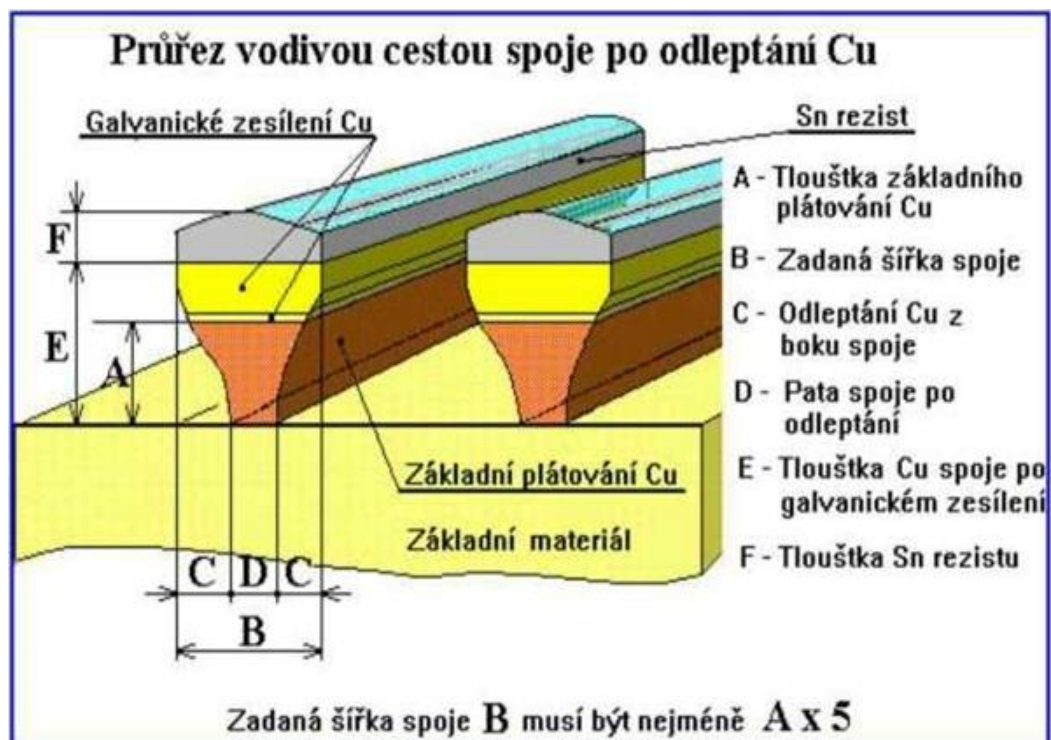
## 2.6 Podleptání

Leptáme-li povrch tělesa, nemůžeme zaručit kolmost vyleptaných stěn oproti neleptanému povrchu. Kdybychom tedy provedli řez vyleptaného povrchu, viděli bychom, že místo ideálních vyleptaných obdélníků jsou spíše lichoběžníky. To zmenšuje vodivou cestu a zvětšuje zahřívání desky a její větší tepelné namáhání.



Z obrázku jde vidět, že první čtyřhran je ideálně vyleptaná část, druhý tvar je nedoleptaný kov (měď), třetí tvar je podleptání při použití tekutého fotorezistu a čtvrtý za použití suchého (písmeno W označuje použitelnou šířku vodiče).

Obr. 19 Druhy podleptání a nedoleptání fotorezistu



Obr. 20 Podleptání mědi po leptání

Protože pata podleptání vodivé vrstvy je typicky menší než vrchní část, musí se tato část měřit, jestli splňuje požadavky na šířku vodiče.

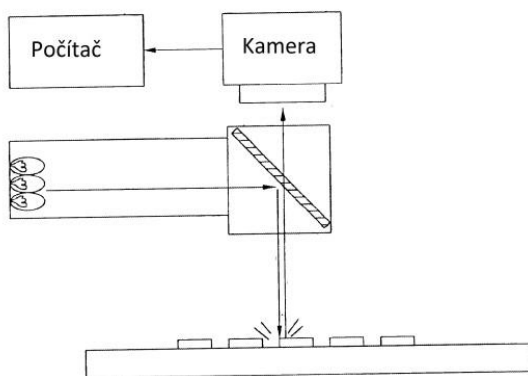
### 3 Kontroly desek plošných spojů u výrobce

Desky se kontrolují během výroby spíše namátkově, protože některé z testů na nich prováděných bývají destruktivní. Nejčastěji se desky detailně kontrolují při zavedení nového produktu do výroby. Výrobce provádí testy obvykle až na hotovém výrobku, testy v mezioperačních procesech jsou méně časté.

#### 3.1 AOI + vizuální testování dle rozměrových výkresů

Jako každá součástka i deska musí mít výkres (nejčastěji v CAD formátu), který přesně určí veškeré její parametry, rozměry vodičů, odstupy součástek atp. A podle této zprávy je možné desku opticky zkontrolovat, jestli je na ní vše, jak má být, jestli nikde nedošlo ke zkratu, nebo naopak k vodivému rozpojení. Ovšem používat ji na tuto opakující se činnost člověka je nepraktické, a tak byla zavedena automatická optická inspekce (automated optical inspection – AOI).

V principu desku snímá kamera, která snímáný obraz nahrává do počítače, jenž má v sobě předlohu toho, jak by deska měla dle výkresu vypadat. Tento počítač porovnává obraz desky s její předlohou, a když se obraz od předlohy liší příliš, vyhlásí chybný sektor a upozorní operátora na chybu a označí ji.



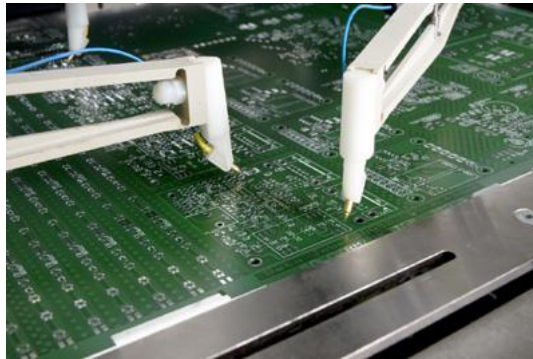
Obr. 21 Princip AOI



Obr. 22 AOI ve firmě PULS

### 3.2 Létaající sonda (flying probe) testy

Tyto testy se používají hlavně pro koncové testování desek ve výrobě nebo například u testování prototypů i u jednotlivých vrstev. Létaající sonda využívá elektromechanicky ovládané sondy, které se dotýkají vodivých spojení a kontrolují elektrickou vodivost spojů. Je to elektrická povrchová kontrola bez připojeného zdroje na desku.



Obr. 23 Testování létající sondou

### 3.3 Kontrolní výbrusy

Jelikož se potřebujeme podívat do desky, jestli je v desce dle technické zprávy vše správně, musí se udělat kontrolní výbrus, který toto vše prověří. Ve výbrusu se měří například tloušťka nepáživé masky, tloušťka mědi na povrchu nebo tloušťka nakovené mědi v otvoru.

- U výrobce

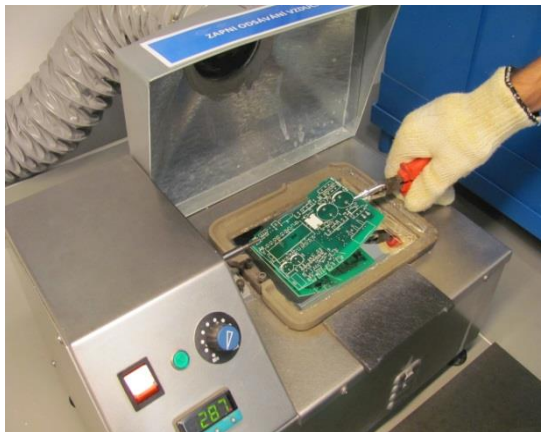
Následně obvykle výrobce připravuje rozměrovou zprávu, kterou přikládá k desce fyzicky, k dodávce, společně s výbrusem, pro koncového odběratele jako potvrzení o správnosti technologického postupu při výrobním procesu.

- U odběratele

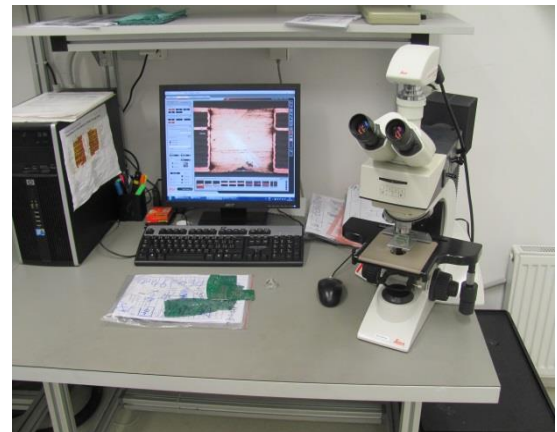
Výbrusy se vytvářejí ve firmě PULS, například jestliže desky přijme firma od jiného dodavatele, než od kterého je odebírala doposud. Činí tak i při kvalifikaci nového dodavatele, nového výrobku nebo namátkovou kontrolou při sériových dodávkách.

Pro výbrus se vybírá oblast, kde by mohly být problémy nakovením otvoru nebo se zatékací pájky. Poté se tato část vyřízne z desky ven (čímž dojde ke zničení desky) a vloží se do cínové lázně, aby se do otvorů mohla dostat pájka. Poté se musí součástka upevnit nejlépe do plastového držáku (klipu), aby se s ní obsluže lépe pracovalo při broušení. Poté se část desky brousí na brusných kotoučích od nejdrsnějšího k nejjemnějšímu až po leštící kotouče, které mají za úkol vyleštit výsledný povrch, aby se dal lépe pozorovat na mikroskopu. Poté se již jen musí daný výbrus popsat a zkontrolovat na mikroskopu, jestli je doopravdy vše tak, jak má být.

Mikroskop bývá často spojen s počítačem pro přesnější měření a lepší dokumentaci dat. Odběratel vyhodnocuje namátkové vzorky také dle normy IPC-A-600.



Obr. 24 Cínová lázeň



Obr. 25 Mikroskopové stanoviště

### 3.4 Nedestruktivní testy u odběratele

Odběratel sám nemá mnoho možností, jak se o kvalitě dodávaných desek kvalifikovaně přesvědčit. Z nedestruktivních zkoušek zbývá vlastně jen možnost ověření základních rozměrů a kontur, přesnost a velikost vrtaných otvorů nebo adheze nepájivé masky. Elektrická funkce desky může být ověřena až na relativně hotovém výrobku, tedy již v procesu, který s sebou nese náklady na přidanou hodnotu výrobku.

### 3.4.1 Test lepicí páskou – tape test

Adheze nepájivé masky se zkouší „tape testem“. Princip spočívá v tom, že na desku se předtím, než se na ní napájí součástky a je jakkoli opracována, přilepí lepivá folie, která je velmi podobná běžné lepicí pásce. Poté se páska jedním rychlým pohybem musí strhnout. Zůstane-li na pásce kousek, nebo dokonce celá nepájivá maska, je jasné, že její adheze je špatná a že je nutno desky jako vadné vyřadit z výroby. Test se samozřejmě provádí na více deskách, aby se zamezilo nahodilým chybám.

## 3.5 Zkoušky ve firmě PULS

Bude-li firma PULS i nadále vyrábět elektrické součástky (elektrické zdroje), bude určitě součástky stále pájet na desky plošných spojů. Ty však, i přes svou poměrně jednoduchou výrobu, mohou mít spoustu vad. A proto ve firmě PULS existuje vstupní kontrola pro ověření kvality materiálu, který do firmy (potažmo i do výroby) vstupuje. Toto oddělení nekontroluje jen desky plošných spojů, ale i většinu součástek vstupujících do firmy.

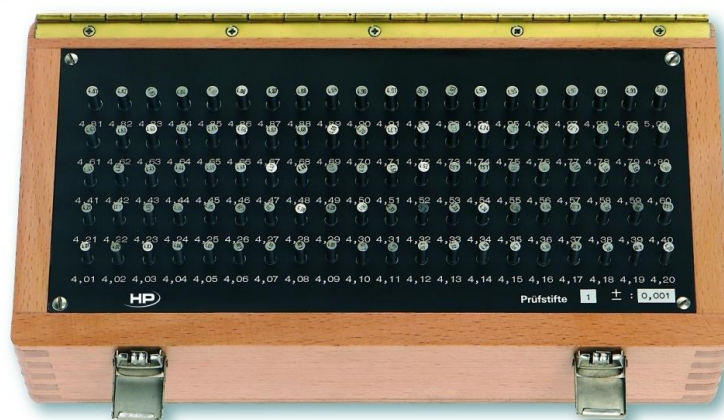
Nejprve se tam zkontroluje, zda deska je doopravdy deska, kterou si firma objednala. To se provede jednoduchou kontrolou názvů desek v objednávce, na balení a na samotné desce. Desky se tedy musejí vyjmout z krabic a musejí se vyndat také z ESD obalů pro tuto a další kontroly.

Poté nastává vizuální kontrola. Desku samotnou tak kontrolor celou prohlédne a snaží se najít chyby. Hledá hlavně delaminace nebo špatně nanesenou nepájivou masku. Tuto kontrolu doprovází kontrola otvorů, při níž se jednotlivé otvory (všechny) musejí prozkoušet, jestli svým průměrem podle výkresu vyhovují. To se provádí válečkovými měrkami, jimiž se otvory zkoušejí. Vždy se vybere otvor a zkouší se měrka o nejmenší možné velikosti, která je dána rozměrem otvoru plus spodní hranicí odchylky, která je pro daný otvor předepsána. Projde-li tato měrka otvorem bez obtíží, lze přistoupit k další měrce, která je ve stupnici o jeden krok dále. Takto se postupuje až k momentu, kdy už měrku nelze zasunout, čímž se stanoví rozměr otvoru čili největší možná měrka, která šla do otvoru zasunout. Lze-li do otvoru zasunout měrku větší, než stanovuje maximální dovolený rozměr, je deska označena za vadnou. Kvůli zdlouhavosti tohoto měření, neboť se musí zkontrolovat každý otvor, se při velkém počtu desek tato kontrola neprovádí.

Nastane-li podezření, že by se nepájivá maska nemusela dokonale spojit se základní deskou, anebo že byla překročena maximální možná vlhkost při balení desky, a proto je odlupování nepájivé masky možné, test se provádí lepicí páskou. Test spočívá v nalepení pásky na povrch desky a poté v jejím prudkém strhnutí. Tento test se provádí minimálně na každém balení desek s podezřením na odlupování nepájivé masky.

Firma PULS odebírá desky plošných spojů od čínských dodavatelů, jako jsou WanZheng nebo SuHang. Tyto desky se vyrábějí v Číně po velkých dodávkách (z ekonomických důvodů) a v různých týdnech. Jakmile do firmy PULS přijde deska, kontrola je závislá na tom, jestli je deska jednovrstvá, dvouvrstvá, nebo čtyř- a vícevrstvá. Čtyř- a vícevrstvé desky se testují pokaždé, když jsou firmě dodány. U jednovrstvých a dvouvrstvých se zkoumá, jestli deska, která byla vyrobena ve stejný týden, již nebyla zkontrolována jako deska nově příchozí. Jestliže se tak stalo, znamená to, že byla vyrobena ve stejnou dobu jako deska předchozí, jen byla o chvilku déle ve skladu v Číně. Jakmile již byla deska se stejným datem týdne výroby zkontrolována, výbrus se neprovádí a deska je prohlášena za dobrou. Metoda vytváření výbrusů je popsána výše.

Čínští dodavatelé mají s firmou PULS smluvní dohodu na výbrus provedený ke každé desce u nich, jejich metodami. Bohužel tento výbrus má mizivou kvalitu a moc se z něj určit nedá. Často to bývá jen kus vystřížený z desky, který je velmi hrubě zabroušen, a tudíž pro mikroskop téměř nepoužitelný. Někdy se stává, že výbrus k desce dokonce ani nepřiloží. Proto si firma PULS dělá výbrusy sama a snaží se kvalitu desky vyhodnocovat ze svých výbrusů, výbrusy provedené čínskými dodavateli nepoužívá.



Obr. 26 Válečkové měrky

## 4 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá jednovrstvými deskami plošných spojů, jejich výrobou, nejčastějšími vadami a základními kontrolami. Jejím smyslem je ukázat zjednodušeně postup výroby desek plošných spojů, jejich možné chyby a kontroly těchto vad.

V první kapitole jsou uvedeny materiály pro výrobu desek. Poté je ukázána výroba desky od začátku, kdy do firmy vstoupí kus jednoho metru čtverečního laminátu pokrytého folií mědi, a postupně po jednotlivých operačních krocích pozorujeme, jak se přířez mění na desku požadovaného tvaru a vlastností, na desku, na kterou již lze osadit a zapájet součástky, aby deska byla plně funkční.

Druhá kapitola je zasvěcena druhům vad, které mohou desku postihnout, ať už při výrobě, nebo při transferu a skladování desky. Uvedeny jsou pouze nejčastější vady, jelikož skutečných vad je nezměrně mnoho a plně je zachycují normy.

Ve třetí kapitole jsou popsány základní druhy kontrol desek. Kontrolovat desky lze mnoha různými způsoby. Uvedl jsem jen ty základní kontroly, které se používají nejčastěji. Avšak tyto testy – i přes jejich jednoduchost – odhalí téměř každou vadu v desce.

Ve firmě PULS investiční, s. r. o., jsem se seznámil s celým kontrolním procesem vstupní kontroly firmy. Firma PULS přímo výrobcem desek plošných spojů není, je to závod, který vyrábí elektrické zdroje. A za sebe mohu říci, že mě až překvapilo, kolik kvalitativních kontrol (nejen na deskách) firma provádí, jen aby si udržela kvalitu na té nejlepší úrovni, aby patřila mezi špičku ve svém oboru. Například pokaždé její pracovníci kontrolují nově přijatou desku, jejíž typ ještě daný týden nekontrolovali. Když jsem se na toto zeptal, bylo mi to zdůvodněno tím, že nevědí, jestli je daná deska vyrobena stejně dobře jako deska před ní, byť by to bylo jen o týden dříve. Aby se tudíž přesvědčili a měli důkaz, že deska je vyrobena ve stejné kvalitě jako deska předchozí, musejí ji otestovat. Také pokaždé, když se ve výrobě vyskytne závada s deskou (např. delaminace), firma okamžitě testuje, zda je to u desky chyba namátková, nebo je vadná celá série přijatých desek. Proto si myslím, že firma PULS dbá velice dobře o kvalitu nejen desek, ale celé výroby.

Byl jsem také v Mělníce na exkurzi ve firmě Printed, s. r. o., která se výrobou desek přímo zabývá. Velice mě překvapilo, kolik chemikálií a materiálu se k výrobě jedné desky spotřebuje. Ale také v jakém prostředí se tam pracuje: Stísněné prostředí starého domu jistě není ideálním místem k výrobě desek. Protikladem je firmě Printed nová hala firmy PULS, která je každodenně čištěna a má ventilaci opatřenou prachovými filtry, které pro zdraví a bezpečnost zaměstnanců uchovávají prostředí v co nejlepší čistotě.



Závěrem bych chtěl dodat, že si nemyslím, že je správné, aby se firmy spoléhaly na výrobu desek v Číně, která sice dodá obrovské množství desek, avšak kvalitou jsou tyto desky absolutně někde jinde než desky vyrobené v Evropě nebo Americe, ať už kvalita týká věcí vstupujících do výroby nebo výsledného produktu. Bohužel je vidět, že cena hraje hlavní roli. A doufám, že se na trhu brzy prosadí nějaká firma evropská nebo americká, která tento náhled změní.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] **Mach P., Skočil V., Urbánek J.,: Montáž v elektronice, ČVUT Praha 2001, ISBN 80-01-02392-3**
- [2]. **IPC-A-600H: Acceptability of Printed Boards, 2010 , ISBN 1-58098629-3**
- [3] **IPC-TM-650H: Test methods manual, 2009 , ISBN 1-580981-38-0**
- [4] **Internetové zdroje**

## Seznam obrázků

1. Propletené svazky skleněných vláken; PULS
2. Druhy děr; Plošné spoje a povrchová montáž (VUT Brno)
3. Vyleptání orazce na povrch desky; Plošné spoje a povrchová montáž (VUT Brno)
4. Podleptání mědi; Plošné spoje a povrchová montáž (VUT Brno)
5. Přijatelné nečistoty v desce; IPC-A-600H
6. Nepřípustné nečistoty v desce; IPC-A-600H
7. Požadovaná sousost otvorů; IPC-A-600H
8. Přijatelná sousost otvorů; IPC-A-600H
9. Nepřijatelná sousost otvorů; IPC-A-600H
10. Cílená adheze nepájivé masky; IPC-A-600H
11. Přijatelná adheze nepájivé masky; IPC-A-600H
- 12.a) Nepřijatelná adheze nepájivé masky; IPC-A-600H
- 12.b) Nepřijatelná adheze nepájivé masky; IPC-A-600H
13. Prohýbání desky; IPC-A-600H
14. Zkroucení desky; IPC-A-600H
15. Správně vyvrtaná díra bez „Etchback“ jevu; IPC-A-600H
16. „Etchback“ jev při špatném vyvrtání otvoru; IPC-A-600H
17. Dobrý propoj mezi vodivou vrstvou desky a pokovením otvoru; IPC-A-600H
18. Nepropojení mezi vodivou vrstvou desky a pokovením otvoru, které je nepřijatelné; IPC-A-600H
19. Druhy podleptání a nedoleptání fotorezistu; IPC-A-600H
20. Podleptání mědi po leptání; [http://www.printed.cz/assets/photos/fullsize/\\_tpv\\_15.jpg](http://www.printed.cz/assets/photos/fullsize/_tpv_15.jpg)
21. Princip AOI; <http://www.freepatentsonline.com/6884988-0-large.jpg>
22. AOI ve firmě PULS; PULS
23. Testování létající sondou;  
[http://www.pcbpool.com/images/pp\\_info\\_technique\\_06\\_gross.jpg](http://www.pcbpool.com/images/pp_info_technique_06_gross.jpg)

24. Cínová lázeň; PULS

25. Mikroskopové stanoviště; PULS

26. Válečkové měrky; [http://www.unimetra.cz/images\\_zbozi/72\\_1\\_small2.jpg](http://www.unimetra.cz/images_zbozi/72_1_small2.jpg)