

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Klasické a moderní metody pájení v elektrotechnice

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Barbora MIKEŠOVÁ**
Osobní číslo: **E13B0376P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Klasické a moderní metody pájení v elektronice**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Popište principy druhů pájení pro elektroniku
2. Uveďte jejich výhody a nevýhody
3. Uveďte alternativy propojování k pájení
4. Zhodnoťte alespoň jednoduše ekonomická hlediska jednotlivých druhů pájení

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. P. Mach, V. Skočil, J. Urbánek; Montáž v elektronice
2. R. J. Klein Wassink; Soldering in electronics
3. K. Suganuma; Lead-free soldering in electronics
4. Y. Li, D. Lu, C. P. Wong; Electrical Conductive Adhesives with Nanotechnologies
5. Internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Hirman

Úsek prorektora pro kvalitu a projektovou činnost

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017

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



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

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na druhy pájení, jejich výhody a nevýhody. Alternativy pájení a ekonomické hledisko pájení.

Klíčová slova

Pájení, pájka, pájený spoj, tavidlo, ruční pájení, strojní pájení, pájení vlnou, pájení přetavením, pájení bez olova

Abstract

This bachelor thesis focuses on the types of soldering, their advantages and disadvantages. Soldering alternatives and economic soldering point.

Key words

Soldering, solder, soldered joint, solder flux, hand soldering, machine soldering, wave soldering, brazing soldering, soldering without lead

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2017

Barbora Mikešová

Poděkování

Děkuji vedoucímu své práce panu Ing. Martinovi Hirmanovi za trpělivost a ochotu, kterou projevil během mého psaní.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	10
PÁJENÍ.....	11
1.1 Pájky.....	11
1.2 Tavidlo	13
1.2.1 Kalafuna.....	14
1.2.2 Vodou rozpustná tavidla	15
1.2.3 Tavidla s nízkým obsahem sušiny	16
1.2.4 Plasma.....	16
1.2.5 Utrazvuk.....	16
1.2.6 Plynné tavidlo	16
2 TECHNOLOGIE PÁJENÍ A ROZDĚLENÍ.....	17
2.1 Ruční pájení	17
2.2 Strojní pájení	17
2.2.1 Pájení vlnou	18
2.2.2 Pájení přetavením	19
3 ALTERNATIVY	25
3.1 Šroubové spojení.....	25
3.2 Ovíjení.....	25
3.3 Svařování.....	25
3.4 Vodivá lepidla	26
4 EKONOMICKÁ HLEDISKA.....	28
ZÁVĚR	29
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	30
PŘÍLOHY.....	31

Seznam symbolů a zkratk

°	.....	značka stupně
C	.....	Celsiova teplota
mm	.....	milimetr
s	.....	sekunda
R	.....	označení nejnižší aktivity tavidla
RMA	.....	označení střední aktivity tavidla
RA	.....	označení aktivity tavidla
RSA	.....	označení superaktivity tavidla
př	.....	příklad
BGA	.....	typ pouzdra integrovaného obvodu pro povrchovou montáž
CO ₂	.....	oxid uhličitý
μm	.....	mikrometr
l	.....	litr
min	.....	minuta
SnPb	.....	slitina cínu a olova
Ag	.....	chemická značka stříbra
Pb	.....	chemická značka olova
např	.....	například
QQ-S	.....	federální norma
MIL-F	.....	vojenská norma
ČSN	.....	česká norma
EN	.....	evropská norma
ES	.....	evropská směrnice

Úvod

Po svařování se jedná o jeden z nejstarších způsobů montáže elektrických zařízení. Technika plošných spojů je starší více než sto let. Ovšem nové techniky pájení a rozšíření se objevili až na počátku šedesátých let dvacátého století. Nejprve se pájelo ručně. Při hromadné výrobě se ovšem tato metoda stala neefektivní. I když se člověk snažil, každá deska byla trochu odlišná. Potřeba zmenšovat součástky a desky plošných spojů vede k vývoji hromadného pájení. To je vyvíjeno tak, aby se minimalizovala chybovost, snížila spotřeba pájky, hmotnost desky a také aby bylo možné použít užší spojové cesty [1].

Pájení

Pájení je metalurgický způsob spojování materiálů. Netaví se spojované díly a tím pádem z nich nevzniká nová slitina. Taví se a opětovně chladne jen přídavný materiál, který nazýváme pájecí slitina. Tato slitina má vždy nižší teplotu tání než je teplota tání součástí. Pro montáž se používají měkké pájky, které jsou nejrozšířenější a to díky jejich teplotě tání, jenž je do 450°C. Pájený spoj vzniká na rozhraní pájky a pájeného předmětu. Lze pájet nekovové materiály. Máme i pájky tvrdé ty jsou nad 450°C a používají se na více zatížené spoje a při pájení žáruvzdorných a žáru pevných ocelí.

Při pájení probíhají složité fyzikálně-chemické pochody na rozhraní tuhé a tekuté fáze. Dva volné povrchy jsou nahrazeny jediným rozhraním s nízkou volnou energií. Na mezifázovém rozhraní se vytvářejí vazby nejprve v izolovaných místech a postupem času se rozšiřují na celou plochu styku. Proces lze hodnotit jako chemickou reakci probíhající na rozhraní fází. Vznikají vazby mezi atomy. V oblasti slévání je roztavená pájka charakterizována těsným uspořádáním. Atomy taveniny jsou ve sféře působení atomů krystalové mříže tuhého kovu na povrchu uspořádány krystalograficky. Na rozhraní se vytváří vrstva tvořící vazbu mezi fázemi. Teplem se zvětšuje pohyb atomů obou fází a jejich vzájemná difúze zesiluje vytvořené vazby.

Vliv na dobrý pájený spoj mají správné velikosti mezer (0,05-0,2mm), okolní prostředí a tavidlo [1]

1.1 Pájky

Pájky pro měkké pájení jsou tvořeny těžkými kovy s nízkou teplotou tání. Jedná se hlavně o cín, olovo a zinek. Některé pájky obsahují indium, antimon a bismut. Můžeme se setkat i se stříbrem, mědí, niklem anebo železem. Většinou se jedná o dvou nebo tříložkové slitiny. Čisté kovy a složitější slitiny se používají pro zvláštní případy.

Nejčastěji používané jsou pájky cínové, které se slučují skoro se všemi kovy. Nejčastěji se používalo olovo. S cínem 61,5% tvořili eutektickou slitinu s teplotou tání 183,3°C[1].

Eutektická slitina je taková, kde se žádná její složka nevyskytuje samostatně, a veškeré krystaly obsahují stejný poměr jednotlivých součástí. Tato slitina má ze všech jiných poměrů stejných kovů nejmenší teplotu tání [2].

Pájka obsahuje i příměsi – prvky, které negativně ovlivňují vlastnosti, jako je smáčivost, pevnost a pájitelnost.

Měď při obsahu větším než 10%, zhoršuje roztékavost. Po zatuhnutí je pájka tvrdá, křehká a hrubozrnná. Kadmium při obsahu větším než 0,01% způsobuje křehké a porézní spoje. Pájka pomalu zatéká do kapilár. Spoj má pískovou strukturu. Pískovou strukturu má i železo při větším obsahu než 0,01%. Zlato působí zrnitě a křehce v pájce. Hliník (nad 0,05%) a zinek (nad 0,001%) mohou za to, že je pájka špatně tekutá, porézní a na povrchu tvoří dendritické obrazce. Arsen vyvolává tvorbu útvarů podobné puchýrkům. Stříbro způsobuje tmavý povrch bez lesku pájky. Stříbro má také pozitivní vlastnost snižuje schopnost rozpouštět jiné kovy. Fosfor v koncentraci 0,001% - 0,004% má redukční účinky a snižuje oxidaci pájky.

Pájka se během používání znečišťuje. Hlavními zdroji je rozpouštění základních materiálů a povrchových úprav mechanických dílů na deskách smáčených spolu se spoji. Dalším zdrojem mohou být součástky přilepené na stranu pájení spadlé do lázně během průchodu vlnou [1].

Od roku 2003 je olovo zakázané používat v elektronice dle směrnice 2002/95/ES ze dne 27. ledna 2003 [3]. Proto se v pájení hledají náhrady do pájek, které splňují vlastnosti velmi blízké olovu. Jedná se o fyzikální a mechanické vlastnosti, smáčitelnost, srovnatelnost s metalurgickými vlastnostmi na rozhraní materiálů a fází ve spoji. Vždy žadáným parametrem je vysoká elektrická a tepelná vodivost. Také je žadáná nízká hodnota teplotní délkové roztažnosti, které podmiňuje dlouhodobou funkčnost pájených spojů. Z materiálového hlediska se sleduje zvyšování pevnosti slitiny a její mikrostruktura. Prvním krokem při návrhu nového materiálového systému je výběr základných materiálových složek. Kritéria jsou nízká teplota tání základných kovových složek, nízká toxicita, stabilita vlastností v celé řadě vlivů prostředí, snadné a levné použití, nízké povrchové napětí a dobrá smáčivost.

Použitelné slitiny se skládají z dvou až pěti složek. Některé více složkové slitiny byly navrženy pro aplikaci ve strojírenství, nebo jako cílená háhrada za Sn-Pb. Náhrada olova má nepříznivý vliv na růst ceny. Cenu ovlivňuje cena surovin pro nové pájky bez olova a cena surovin je ovlivněna dostupností surovin.

Prvky systému bezolovnatých pájek mají specifické požadavky na aktivitu tavidla, což se může projevit v dalších teplotních podmínkách na nastartování jeho působení. Můžeme očekávat tvorbu různých intermetalických sloučenin a je třeba objasnit jejich tvorbu v závislosti na teplotních podmínkách. I když bylo prozkoumáno mnoho nadějných slitin, ne všechny jsou použitelné zcela obecně, jejich vlastnosti vyhovují jen pro určité případy.

Indium snižuje bod tání, dobře smáčí. Ve slitině s cínem má dobré mechanické vlastnosti. Protože je dražší než Ag, je málo dostupné a pro hromadné nasazení je nepraktické.

Zinek také snižuje bod tání, je levný, ale snadno oxiduje. Tvoří centra korozí a velmi snižuje smáčitelnost. Pro redukci oxidů vyžaduje aplikaci nových silně aktivovaných tavidel.

Bismut také snižuje bod tání, ale je drahý. Převážně se získává jako odpad z rafinace Pb, takže jeho cena bude ještě stoupat až do objevení nového ekologického zdroje.

1.2 Tavidlo

Tavidlo redukuje vrstvu oxidu na povrchu pájeného předmětu. Povrch musí dobře smáčet, chránit již očištěný kov a pájku před další oxidací a také musí mít vysokou viskozitu, která napomáhá roztékání pájky. Tavidlo ovlivňuje povrchové napětí pájky a tím také zatékání pájky a vznik můstek a krápníků. Korozně aktivní a elektricky vodivé zbytky tavidel a jejich reakčních produktů jsou nežádoucí. Umytí těchto reziduí je někdy nezbytné a s ohledem na ekologické a hygienické požadavky nesnadné a nákladné. Použitelnost tavidla závisí i na jeho toxicitě a řídí se požadavky na hygienu a ekologii [1]. V tab.1.1 je rozdělení tavidel pro měkké pájky. Lze pájet i bez tavidla, ale je potřeba očistit povrch jiným způsobem vhodným k pájení.

Tab. 1. 1 Rozdělení tavidel pro měkké pájení [4]

Typ tavidla	Základní složka	Aktivátor	Forma	
pryskyřičná	přírodní kalafuna	bez aktivátoru halogenový aktivátor nehalogenový aktivátor	roztok pevná látka pasta	
	umělá kalafuna			
organická	rozpustná ve vodě			
	nerozpustná ve vodě			
anorganická	soli			s chloridem amonným
				bez chloridu amonného
	kyseliny			kyselina fosforečná
				jiná kyselina
zásady	aminy nebo amoniak			

1.2.1 Kalafuna

Nejrozšířenější jsou tavidla kalafunová. Základem je přírodní pryskyřice. Aplikuje se rozpuštěná v organických rozpouštědlech. Kalafuna je slabě aktivní, proto se přidávají aktivátory. Aktivátory jsou dvou typů. Jedním typem jsou organické kyseliny, které se používají jen k pájení méně náročné elektroniky. Důvodem je špatná rozpustnost organických kyselin a korozivita. Druhým typem aktivátorů jsou organické aminhydrochloridy. Aktivátor se teplem rozkládá na aktivní složky (chlor a amoniak). Velké množství aktivátoru rozloženého teplem pájení se odpaří a zůstanou pouze reakční produkty. Druhý typ aktivátoru je bezpečnější než první typ [1].

Kalafunová tavidla se podle množství aktivátoru rozdělují. Tyto typy jsou definovány ve Federální normě QQ-S-571 a Vojenské normě – Military Specification MIL-F-14256 a také ČSN EN 29454.

- **R (Rosin) Nejnižší aktivita**

Čistá vodní bílá pryskyřice je rozpuštěna v lihovém ředidle. S relativně slabou čistící schopností, je tavidlo vhodné pouze pro vysoce hájitelné povrchy. Lze použít na čištění zlatých povrchů. Malá agresivita na měděné, cínové nebo cíno-olověné povrchy. Tavidlo typu R nemusí být odstraněno po pájení.

- **RMA (Rosin Mildley Activated) Střední aktivita**

Zvýšené aktivity lze dosáhnout přidáním malého množství vhodných organických směsí. Normy převážně neudávají, jaké směsi by měli být použity, ale udávají chemické a elektrické testy, které musí tavidlo RMA splňovat. Jako aktivátory se používají aminohydrochloridy, polybazické karbonové kyseliny a allylové organické halogenidy. Tavidlo RMA je vhodné pro použití se snadno hájitelnými materiály (měď, zlato a cíno-olověné pájky). Zbytek tavidla je považován za netečný a jeho odstraňování je volitelné. Neúplné odstranění může způsobit více škody než užitku. Dokud je aktivátor vázaný v pryskyřici, je pozastaven proces koroze. Při částečném rozpuštění pryskyřice v odpovídajícím procesu čištění, může být rozptýlen aktivátor po povrchu urychlující korozi.

- **RA (Rosin Activated) Aktivita**

Příměsi v tavidlech RA jsou agresivnější než příměsi v tavidlech RMA. Normy opět definují testy, které musí tavidlo splnit. Tavidlo je vhodné pro pájení kovů, které nejsou ihned pájitelné s typy R a RMA. Způsobují urychlené smáčení snadno pájitelných kovů, to redukuje úroveň defektů v pájecím procesu. Pro vysokou úroveň aktivity, by mělo být tavidlo úplně odstraněno. Zůstatky na desce, podporují dlouhodobou korozi, hlavně ve vlhkém prostředí.

- **RSA (Rosin Super Activated) Superaktivita**

Tato pryskyřice není formálně součástí vojenské normy, ale je běžně používaná s vyšší aktivitou než tavidla RA. Stejně jako tavidlo RA musí být zbytky úplně odstraněny, pro snížení pravděpodobnosti koroze [5].

1.2.2 Vodou rozpustná tavidla

Vyvinuta pro omezení používání chlorovaných a fluorovaných uhlíků k čištění zapájených desek. Tavidla po pájení snadno odstraněna nejběžnějším rozpouštědlem a to je voda. Odstraňování vodou je velmi levné. Tavidla se vodou neředí. Aktivita tavidel je upravována přísadami. Neobsahují žádnou kalafunu. Tato tavidla v pájení velmi účinná. Používání trochu problematické, z důvodu koroze. Vodou rozpustná tavidla jsou tekutá i po pájení. Zbytky zůstávající po očištění v nedostupných místech, mohou putovat po povrchu, vyvolat korozi a zvětšit svodové proudy.

1.2.3 Tavidla s nízkým obsahem sušiny

Tato tavidla jsou nejnovější a jedná se o tavidla pryskyřičná. Obsah sušiny je v rozmezí 2 - 6 % z hmotnosti. Nízký obsah sušiny zaručuje nanášení minimálního potřebného množství tavidla, které zreaguje při pájení beze zbytku. Díky tomu se po pájení nemusí méně náročné elektronické výrobky čistit vůbec anebo jen minimálně, což usnadní a zrychlí čistící proces. Nevýhody tavidla s nízkým obsahem sušiny je nutnost odpařit při předehřívání desky větší množství rozpouštědla a vzniklé páry odsát a zlikvidovat. Tato tavidla jsou silně aktivována, a proto je vždy potřeba u náročnějšího zařízení omýt zbytky tavidla.

Lze pájet i bez tavidla, ale je potřeba očistit povrch jiným způsobem vhodným k pájení. Očistit povrch můžeme plasmou, ultrazvukem nebo přidáním ochrany před oxidací do pájky.

1.2.4 Plasma

Byla vyvinuta zařízení využívající plasmu. Osázené desky procházejí komorou se sníženým tlakem. V komoře je plasma, která zbavuje povrch součástek od oxidů. Takto očištěná deska vstupuje do zařízení k pájení vlnou. Celý proces musí probíhat v dusíkaté atmosféře, aby bylo zabráněno opětovné oxidaci součástek a aby nedošlo k oxidaci pájky ve vlně. Další varianta plasmového čištění je působení plasmy k vytvoření pórů v oxidech, které se po ohřevu před pájením nasatí zkondenzovanou vodou. Po vstupu do lázně pájky dochází k mikroexplozím způsobené vodní párou, které odstraňují oxid z povrchu.

1.2.5 Ultrazvuk

Tento princip čištění probíhá přímo ve vlně pájení, kde musí být systém sonotrod. Zařízení pracuje v dusíkaté atmosféře stejně jako s plasmou. Je potřeba ověřit, že součástky mohou být zatížené ultrazvukem.

1.2.6 Plynné tavidlo

Používá se směs vodíku a dusíku. Podíl vodíku je obvykle 3-8 %. Oxidy se za zvýšené teploty částečně rozpouštějí v dusíku a zcela redukují ve vodíku. Tento způsob lze dodatečně instalovat do zařízení na pájení vlnou nebo přetavením. A to vestavením plynového

hospodářství a utěsněním. Nejvíce používaný při pájení flip-chip technologií [1].

2 Technologie pájení a rozdělení

Správný pájený spoj by měl zaručovat dobré elektrické a mechanické spojení. Optimální množství pájky je takové, aby byly zřejmé obrysy vodiče pod vrstvou pájky. Povrch pájky musí být hladký, lesklý, spojitý a na okrajích spoje musí být patrný úhel smáčení (15° - 20°). Dále na povrchu nesmí zůstat ostré výstupky a známky znečištění. Ve spoji nesmí zůstat obnažený základní kov spojitých částí. Ke zhotovení pájeného spoje je potřeba několik základních úkonů, které se mohou časově a místně spojovat i rozdělovat. První úkon je poskládání pájených částí na správnou polohu k ostatním částem a jejich fixace. Druhý úkon je nanést tavidlo a aktivovat ho. Třetí úkon je ohřátí spoje na provozní teplotu. Čtvrtý úkonem je přivedení pájky do spoje. Pátým úkonem je ochladit zapájený spoj. A posledním úkonem je spoj očistit.

Základní rozdělení pájení je na ruční a strojní. Strojní se dále rozděluje podle techniky pájení.

2.1 Ruční pájení

Ruční pájení je nejstarší způsob pájení. Spoj je ohříván hrotem ruční páječky. Tavidlo se nanáší před vlastním ohřevem anebo se během ohřevu uvolní z dutiny v trubičce pájky. Ruční pájení je velmi rozšířené, ale ne moc spolehlivé. Pracovník, provádějící pájení, není schopný přesně opakovat všechny potřebné úkony důležité pro kvalitní spoj. Nepřesná je doba pájení, tepelné zatížení spoje a množství pájky ve spoji. Moderní stroje, kontrolující kvalitu spoje, potvrzují špatnou reprodukovatelnost ručně prováděných spojů. Ruční pájení proto vhodné na opravu špatně strojem připájených spojů anebo jako dodatečné připájení součástek, které se nemohly připájet společně s ostatními při strojním pájení.

2.2 Strojní pájení

Strojní pájení je způsob pájení, kdy jsou všechny potřebné základní úkony prováděny automaticky, bez přímého zásahu obsluhy. V šedesátých a sedmdesátých letech dvacátého století veškeré součástky byly vývodové a proto po připojení na desku se pájelo vlnou. Základní postup operací byl následující. Vstupní kontrola desek s plošnými spoji. Poté se

deska osázela vývodovými součástky do součástkových otvorů. Poté se pájelo vlnou a následovalo očištění. Posledním krokem byla kontrola a případné opravy.

Počátkem osmdesátých let nastupuje povrchová montáž, která měnila výrobu v základech. Za změnou stály nové součástky s novými tvary a provedením vývodů, vsazovací stroje, pokroky v pájecích pastách a jejich nanášení na připojovací plošky, zvýšená účinnost, a nové principy pájení přetavením, lepší čisticí procesy a zařízení.

Základem povrchové montáže jsou vsazovací stroje umisťující součástky na desky plošných spojů. S postupem integrací součástek a funkcí klesají rozměry součástek a rozteče jejich vývodů a to zvyšuje nároky na vsazovací stroje. Zmenšování roztečí vývodů a nástup pouzder se stále menšími roztečemi ovlivňuje technologii pájení, po stránce postupů, zařízení a materiálové. Narůstající podíl povrchové montáže preferuje pájení přetavením před pájením vlnou.

2.2.1 Pájení vlnou

Jedná se o nejužívanější zařízení. Operace ohřevu a dodání pájek je spojena v jednu. Zařízení je většinou konstruováno jako součást výrobní linky. Nedílnou součástí je zařízení na nanášení tavidla a pro předehřátí desky plošného spoje. Průběh teploty od vstupu do předehřívací lázně až po výstup ze zařízení je přizpůsoben optimálnímu provedení všech dílčích procesů.

Nanášené tavidlo je vždy v kapalném stavu a může se nanášet více způsoby. Nejčastější jsou nanášení vlnou (obr. 1.1), nanášení napěněním (obr. 1.2), nanášení nástřikem (obr. 1.3). Úkolem je nanést tavidlo rovnoměrně na straně pájení, bez nadbytku. Vhodné jsou postřiky, kde není potřeba stlačený vzduch.

Předehřev následuje po nanesení tavidla na desku na dopravníku. Z důvodu rovnoměrného ohřevu se pracuje s infračerveným zářením ve střední nebo vzdálené oblasti. V průběhu předehřevu se odpaří těkavé složky tavidla a deska se součástkami se postupně ohřeje na teplotu kolem 130°- 150°C. Po dosazení této teploty začíná redukční proces tavidla. Je také snížen teplotní šok na desku a pájené součástky před stykem s roztavenou pájkou. Jednoduchá pájecí vlna je tvořena proudem pájky hnaným čerpadlem tryskou tvarovanou tak,

aby směr a rychlost zabezpečilo dokonalé smočení všech připojovaných míst a zajistilo správný tvar výplně pájky v každém jednotlivém spoji (obr. 1.4). Doba setrvání ve vlně je 3s – 5s. Při povrchové montáži, při které jsou součástky na straně pájení přidrženy lepidlem, je vysoká hustota připojovacích míst spolu s hustou a vysokou zástavbou příčinou vzniku stínů, které brání vniknutí pájky na všechna pájená místa. Lepší výsledky přináší vlna dvojitá. V první vlně je turbulentní proudění zajišťující dobré zatečení pájky. V druhé vlně je laminární proudění, které definuje množství a tvar výplně pájky ve spoji (obr. 1.5 a). Turbulence jsou vyvolány různými hradítky v trysce, mechanickým kmitáním hradítek apod.

Při nastavování pájecího zařízení musíme respektovat maximální hodnoty pro dobu pobytu součástky v pájce specifikované výrobcem. Dutá vlna je výhodnější z důvodu délky styku s pájkou, která je jen několik centimetrů (obr. 1.5 b). Tvorbě krápníků a můstků zabráníme nastavením co nejmenší relativní rychlosti desky vůči proudu pájky a optimálním sklonem dopravníku v místě výstupu.

U všech zařízení pro pájení vlnou dochází k intenzivní oxidaci povrchu pájky kyslíkem z okolního prostředí. Tomu zabráníme pokrytím povrchu lázně vrstvou oleje nebo využitím ochranné atmosféry s minimálním obsahem kyslíku [1].

Pájky bez olova přinášejí potřebu ověřit vhodnost a použitelnost stávajících tavidel a případně je nahradit novými. Musí se optimalizovat teplotní profil a odzkoušet jeho stabilitu s ohledem na vyšší hodnoty teplot v základním nastavení. Musí se vyměnit náplň pájky a připravit zásobu na doplňování úbytku lázně. Náklady na náplň pájky bez olova je asi třikrát vyšší než u stejné náplně pájky s olovem. Vzhledem k menší hustotě je náplň při stejném objemu lehčí. Bezolovnaté pájky se pájí v dusíkaté atmosféře. Je třeba dbát zvýšené požadavky na zamezení znečištění pájecí lázně, které může způsobit olovo z pokovených vývodů původně určených pro pájení pájkou s olovem.

2.2.2 Pájení přetavením

Charakteristické pro tuto technologii je nejprve nanést potřebné množství pájky na povrch pájených předmětů před samotným procesem pájení. Pájený spoj vznikne roztavením pájky po přiložení spojovaných míst k sobě.

Montážní proces můžeme rozdělit na proces předcházející přetavení, vlastní přetavení a procesy následující po přetavení. První proces zahrnuje přípravu podložky, pasty a součástek, nanesení pájecí pasty a vložení součástek do ostrůvků pasty na připojovaných ploškách. Proces přetavení zahrnuje jeden i více současně působících způsobů přenosu tepla (proudění, vedené a záření). Do toho vstupuje okolní atmosféra, inertní nebo aktivní.

Díky různým pozorováním a vyhodnocováním moderní přístrojovou výpočetní technikou je možné pozorovat průběh jednotlivých etap procesu přetavení a využít získané informace k nejlepšímu možnému výběru materiálů a postupů vedoucích ke kvalitnímu výsledku s minimem vad. Pájený spoj se při přetavení formuje během čtyř stádií. První stádium je aktivace tavidla přítomného v oblasti spoje, které účinkuje ve známém teplotním intervalu. V druhém stádiu se začíná tavit kovový obsah pájecí pasty. V třetím stádiu se smáčí povrch pájených předmětů roztaveným kovem a spojí je dohromady. Během tohoto stádia vznikají intermetalické mezivrstvy. Čtvrté stádium je ochlazování, tuchnutí tekuté pájky a formulování konečného tvaru a struktury spoje.

Na počátku procesu probíhá na povrchu pasty difúze a v případě, že je přenos tepla velmi rychlý, může dojít k odpařování až varu v objemu pasty. Objem pasty se zmenšuje a povrch se stává matně šedým. Když je teplota již dostatečně vysoká, tavidlo se taví a klesá jeho viskozita. Díky nízké viskozitě tavidlo pokryje povrch pasty a připojované plošky a svojí chemickou reakcí redukuje oxidaci na povrchu částic pájky i plošky. V této fázi se mění vzhled pasty z matně šedého na lesklý. Kovový podíl pasty zmenšuje svůj objem a tekuté tavidlo, které má menší hustotu, zaplavuje částice. Případné nerovnosti v rozložení teploty v objemu pasty vytvářejí podmínky pro vznik bublinek a dutin v tavenině. K tavení nedochází okamžitě, jak očekáváme u eutektického složení pájky, ale lze rozdělit oblast tavení na tři zóny. Zónu těstovité směsi taveniny a pevných částic, zónu již natavených částic s doposud kulovitým tvarem a zónu zrcadlově hladké taveniny.

Konečný tvar a vzhled spoje závisí na množství pájky, smáčeném povrchu připojovací plošky a vývodu, místním i časovým rozdělení teploty v pájených částech při tvorbě spoje, výchozí smáčitelnosti plošky a vývodu. Snižující se rozteč vývodů zvyšuje pravděpodobnost vzniku zkratů způsobených můstky pájky.

Nanesení pájky lze jako malé částice kulovitěho tvaru v pájecí pastě deponované (sítotisk nebo šablonový tisk) nebo jako kompaktní pájka nanesená některou novou technologií (př. dávkování)

- **Nanášení pájky dávkováním (dispenze)**

Na potřebná místa se dopravuje potřebné množství pastovité pájky ručním nebo strojním dávkovačem, nebo přenosem jehlou. Nanášení dávkováním není významný z hlediska hromadné produkce k dodržování úzkých technologických tolerancí. Je vhodný k výrobě s velkou růzností typů (kusovou, vzorkovou), kdy by nebyla efektivní příprava šablon nebo sítí.

- **Nanášení sítotiskem nebo šablonovým tiskem**

Sítotisk je nanášení pasty přes síto, které je tvořeno vlákny z polyesteru nebo nerezové oceli a rámu. Sítotisková šablona je vytvořena fotocitlivou emulzí, tak že některá oka tkaniny zůstanou emulzí vyplněna a některá oka budou bez emulze (budou průchozí). Po nanesení se výška nanesené vrstvy pájky sníží o třetinu, protože se pájka lehce roztáhne do šířky.

Šablonový tisk je nanesení pasty přes síto, kde je použita folie s otvory pro průchod pasty. Tloušťka tisku je tvořena přímo tloušťkou folie. Folie má lepší rozměrovou stabilitu a přesnost. Výroba šablony se provádí leptání, řezání laserem nebo galvanoplastikou. Leptání je nejlevnější metodou. Řezání je přesnější než leptání, ale je dražší. Galvanoplastika neboli pokovení, vytváří šablonu narůstáním kovové vrstvy na podkladu, kde jsou fotorezistem vytvořeny obrazce otvorů.

Volba způsobu pájení přetavením je závislá na druhu pájených desek, hustotě a typu součástek, na rozměrech pouzder a jejich variabilitě na pájených deskách, na konstrukci desek plošných spojů, na ekonomických aspektech a spousty dalších věcech. Vznik pájených spojů a jejich jednotná kvalita souvisí hlavně s distribucí tepelné energie v pájených předmětech, na jejich tepelných vlastnostech a hmotnosti a na vlastnostech jejich povrchu. Důležitá veličina je tepelná kapacita materiálů – desek plošných spojů a rozměrnějších desek polovodičových součástek. Pájení přetavením můžeme rozdělit podle způsobu ohřívání [1].

Pájky bez olova pro pájení přetavením také musí mít dusíkatou atmosféru. Pájky se zinkem mají kratší životnost, protože i v pastě nejsou kuličky této pasty dostatečně stabilní. Mohou vytvářet korozní centra v zapájených spojích, a proto se nehodí pro výrobky v náročném provozním prostředí. Je třeba dosáhnout velmi rovnoměrného ohřevu, aby se potlačil negativní důsledek horší roztékavosti pájky.

2.2.2.1 Pájení zářením (infračervené, světelné)

Toto pájení je založené na absorpci záření různých vlnových délek pájenými předměty. Množství absorbovaného tepla závisí na koeficientu. Velkost koeficientu souvisí s vlnovou délkou záření a barvou povrchu. Při pájení infračerveným zářením dochází k většímu zahřívání součástky s tmavším povrchem, než místa s pájecí pastou. To způsobuje nerovnoměrné rozložení teploty na povrchu desky plošného spoje, to má vliv na kvalitu pájení a tepelné namáhání součástky.

Výhoda pájení zářením je vysoká účinnost, která je v rozmezí 60 – 70%. Nevýhody jsou nehomogenní ohřev, jenž závisí na vlastnostech součástek a materiálu desky plošného spoje, nevhodnost pro pájení součástek typu BGA [6].

2.2.2.2 Pájení laserem

Při pájení laserem je paprsek programově řízený k lokálnímu přetavení pájecí pasty. Ohřev je velmi krátký, několik milisekund. Využívá se pulzních nebo plynových laserů (CO₂). Pulzní laser generuje impulzní laserový paprsek o vlnové délce 1,06 μm. Záření je absorbováno kovy, proniká sklem a většinou plastových hmot. Při přemísťování paprsku během pájení není nutné paprsek vypínat. Plynový laser generuje vlnovou délku 10 μm. Větší vlnová délka hůře prochází kovy. Může docházet k zničení plastových částí na desce. Plynový laser má silnou odrazivost a není vhodné ho používat pro pájení bez tavidla.

Výhody pájení laserem jsou velká flexibilita procesu, možnost použití rozdílných pájek, minimální teplotní ovlivnění součástek, pájení je vhodné pro materiály citlivé na teplo. Nevýhody jsou malá produktivita spojená s rychlostí a vysoká cena [6].

2.2.2.3 Pájení impulsní

Zahrnuje metody zahřívání spojů (jednoho nebo více najednou) odporovým teplem vhodně tvarovaného nástroje. Nástroj má tvar plné elektrody nebo ohnutého pásu. Nástroj je nejprve přitlačen na vývody položené na pájecích ploškách a potom je proudovými impulzy vyhříván na požadovanou teplotu. Přitlačení musí působit až do vychladnutí pájeného spoje. Tento způsob se využívá při pájení plošných pouzder nebo pouzder čtvercových s vývody páskovými na všech stranách. Zvláštním způsobem impulsního pájení je ohřev odporovým teplem, kdy jsou na vývody přitlačeny dvě navzájem rovnoběžné od sebe izolované elektrody. Ohřev vzniká průchodem proudu elektrodami a přitlačenými vývody na pájecí plošky [1].

2.2.2.4 Pájení kondenzační (v parách)

Využívá se efektu předávání energie při kondenzaci nasycených par vhodné vroucí kapaliny na tuhém chladnějším povrchu. Velmi účinný přenos tepla umožňuje zahřátí tělesa právě na teplotu nasycených par kapaliny. Jsou vyloučeny negativní účinky vzájemného stínění rozměrných součástek na rovnoměrnost ohřevu pájených míst. Jako kapaliny se používají látky neobsahující volný kyslík, a proto nedochází k oxidaci povrchu při pájení. Kapalina musí být inertní k materiálům v součástkách i na desce. Při pájení jsou desky ponořovány do oblasti s předehřátými parami velmi pomalu, aby se zamezilo teplotnímu šoku a náhlému zkondenzování kapaliny na povrchu. Teplotní šok by způsobil předčasné vymytí tavidla z pastové pájky. Deska je ponořena až těsně k hladině vroucí kapaliny do zóny nasycených par. Povrch desky se ohřeje na výparnou teplotu. Doba ohřevu je typicky 20-40 sekund, u větších součástek může být tato doba i několik minut. Tato doba ovlivňuje výběr součástek, které ohřev po tuto dobu nepoškodí [1].

Výhodami jsou možnosti využití vakua. Pájení probíhá bez přítomnosti kyslíku, takže je možné použít tavidlo s nízkou aktivitou. Pájecí pasta se přetaví při kondenzaci, není možné přehřát montážní celek. Nevýhodou pájení v parách je vyšší cena [6].

2.2.2.5 Pájení ohřevem horkou deskou a pásem

Využívá se při výrobě hybridních integrovaných obvodů a soustav spojů na keramických podložkách. Pájené předměty jsou umístovány na vyhřívané rovné desce, jejíž teplota je stabilizovaná na několik desítek stupňů nad bodem tání pájky. Starší pájecí zařízení s kontinuálním pohybem mají nad vyhřívacími deskami instalovaný dopravní pás z tkaniny odolávající pájeným teplotám a přitom s dobrou tepelnou vodivostí. Předměty se pokládají na tento pás. Ohřev probíhá vedením tepla z vyhřívací desky přes pás do podložky. Tato metoda není vhodná pro pájení oboustranné povrchové montáže a pro desky plošných spojů z kompozitů [1].

2.2.2.6 Pájení proudem horkého plynu

Teplu potřebné pro přetavení pájky ohřívacím zařízením se získává průchodem tlakového plynu, nejčastěji vzduch nebo dusík. Množství tepla je regulováno teplotou a rychlostí proudění plynu. Horký plyn je usměřován tryskou na požadované místo vývodu a pájecí plošky. Pro omezení oxidace pájky se preferuje ohřev dusíkem. Pro individuální ohřev mají trysky průměr přibližně 2 milimetry, průtok plynu je malý asi 1,5l/min. Teplota na výstup trysky je 350°C – 400°C. U vícevývodových pouzder se musí zajistit kontinuální rovnoměrný pohyb trysek po všech pájených vývodech. Jsou-li součástky chladné (pokojová teplota 20°C – 25°C) trvá proces i více než desítku vteřin. Proces je podstatně rychlejší pokud jsou předměty předehřátý na teplotu 100°C-150°C. Každá tryska má dvě části. Střední část vyfukuje horký plyn směrem k desce. Koncentricky umístěná část trysky s tvarem mezikruží odsává odražený plyn zpátky. Lze nastavit teplotní profil pro jednotlivé trysky i pro skupiny trysek řídicí rychlost proudění a teplotu plynu. Následná změna profilu je velmi rychlá a snadná. V zónách předehřevu se a ochlazení se používá vzduch a v zóně přetavení se užívá dusík. Musí se dávat pozor u velmi lehkých čipových součástek, proud vzduchu musí mít sníženou rychlost, jinak by se součástka odfoukla z desky. Nejčastější využití v opravářské technice [1].

Nevýhody jsou malá účinnost (20-30%) a větší energetická spotřeba. Výhodou je používání stále stejných zařízení [6].

3 Alternativy

3.1 Šroubové spojení

Jedná se o úplné počátky elektrického zapojování, kdy se montáž prováděla mechanicky. Tato metoda se od nástupu desek plošného spoje v elektronice nepoužívá. Nedokážeme vyrobit šrouby, které by byly natolik malinkaté, aby bylo možné je použít na desky plošného spoje. Proto se přišlo na jiné metody. Metoda šroubového spoje se používá v montáži. Například montáž počítače, základní deska je ke konstrukci připojena šrouby. Ke šroubovému zapojení jsou potřeba šrouby, matice a podložky. K zašroubování se používají šrouby a klíče.

Nevýhodou v elektrickém zapojování bylo, že při špatně přišroubované součástce docházelo k uvolnění součástky z pozice. Výhoda byla rychlá výměna součástky.

3.2 Ovíjení

Další metodou zapojování bylo ovíjení. I to se v současné době nepoužívá v elektrickém zapojování. Ovíjení spočívá v tom, že napnutí drátek se několikrát navine kolem vysokého kovového kolíku. Tento kolík má ostré hrany, které prorážejí povrch drátu. Díky tomu se kovy obou dílů pohřívají do sebe a získají difúzní kontakt. Ovíjené spoje vykazují velkou mechanickou odolnost a elektrickou trvanlivost. Ovíjení se v současné době používá ve vojenských, průmyslových a telekomunikačních zařízeních. Ovíjení je považováno za jistější než pájení. Při použití speciálního nářadí nehrozí vznik studeného spoje, nebo přehřátí součástek a kontaktů. Oprava ovíjeného spoje probíhá odvinutím a opětovným navinutím vodiče. V případě potřeby zkrácení nebo výměna vodiče [7].

3.3 Svařování

Jedná se o nerozebíratelný spoj, vyžadující vytvoření vysoké teploty. Svařovací metody rozdělujeme podle typu zdroje ohřevu a podle ochrany horkého kovu. Nejvýznamnější metodou je svařování obloukem. Zdrojem tepla je elektrický oblouk nejčastěji vytvořený mezi svařovacím dílem a elektrodou nebo svařovacím drátem. Elektrická energie v podobě tepla vytváří oblouk o teplotě až 7000°C, tím se kovy roztaví a spojí. Do spoje lze přidávat materiál, který může být stejný nebo rozdílný od spojovacího materiálu. Výhodou svařování

je pevnost, trvanlivost a těsnost. Nevýhodou svařování je, nerozebíratelnost spojů, změna struktury, tím i mechanické vlastnosti svarových spojů. Další nevýhodou je vznik vnitřního pnutí a deformace materiálu. [8].

3.4 Vodivá lepidla

Hlavní nevýhodou pájení ze současného pohledu je materiál samotné pájky. Pb v pájkách je neakceptovatelný. S perspektivou stále většího důrazu na ekologičnost materiálů užívaných elektronice jsou hledány možnosti využití pájek bezolovnatých nebo jiných spojovacích materiálů. Mezi takové materiály patří vodivá lepidla. Elektricky vodivá lepidla jsou ekologicky akceptovatelná a oproti SnPb pájkám mají výhodu umožňující připojování vývodů až do rozteče 0,1mm.

Elektricky vodivá lepidla se skládají ze dvou složek. Ze složky vazební a ze složky vodivé. Funkce vazební složky je vytvářet izolační matici, v níž jsou umístěné vodivé částice. Vazební složky také musí zajišťovat mechanické vlastnosti a klimatickou odolnost lepidla. Vodivá složka zajišťuje elektrické vlastnosti spoje, hlavně vodivost, ale ovlivňuje i jeho další parametry. Vazební součást lepidel je jednosložková nebo dvousložková. Většinou se používá epoxidová pryskyřice, někteří výrobci používají silikonové nebo polyamidové pryskyřice. Vazební složka se zpravidla vytvrzuje při vyšší teplotě. Teplota vytvrzování je 100-140°C po dobu 30 minut až 2 hodin. Jsou vodivá lepidla, která se vytvrzují při normální teplotě, ale doba je mnohem větší.

Vodivá složka je nejčastěji tvořena stříbrnými, niklovými, paladiovými nebo měďnými pocínovanými částicemi. Tvar těchto částic ovlivňuje vodivé vlastnosti spoje. Nejčastější tvar jsou malé kupičky nebo lupínky. V jednom lepidle jsou všechny kuličky stejné velikosti. Velikost lupínků se v jednom lepidle liší.

Lepení má přizpůsobivý spoj. Dobrou odolnost proti korozi. Je nutná fixace spoje, protože vzniká pod tlakem. Jedná se o celkový ohřev.

V porovnání s pájením, lze obecně říci, že podle většiny parametrů se pájení jeví jako technologicky lepší. Lepené spoje mají srovnatelný odpor jako pájení, ale lepení má větší šum a nelinearitu. Lepené spoje vyžadují aplikaci na kvalitně připravený povrch, aplikace na pájku není možný. U pájených spojů může být kvalita nižší, protože je povrch očištěn tavidlem. Lepené spoje jsou časově méně stabilní a spolehlivé než pájené spoje [1].

4 Ekonomická hlediska

Z pohledu pájení se zákaz používání olova v pájkách jeví jako cenově náročnější. Je náročné najít náhradní slitinu stejných vlastností jako SnPb. Z pohledu metod je pájení nejvýhodnějším pro hromadnou výrobu. Ruční pájení je určené jen pro kusovou výrobu, opravy nebo jako volná zábava. Hromadné ruční pájení je velmi zdlouhavé, každá deska plošného spoje je unikát. Mnohem efektivnější je výroba strojní.

Ekonomická hlediska mohou být z několika pohledů, spotřeba materiálu, spotřeba energie a časová náročnost. Energeticky nejvíce náročné je pájení vlnou, kde se musí stále ohřívat celý zásobník s pájkou nad bod tání, aby bylo možné vytvořit vlnu. Naopak nejméně energeticky náročné je pájení, kde se ohřívá co nejmenší množství materiálu např. pájení laserem.

Na spotřebu materiálu je nejnáročnější pájení vlnou, protože je potřeba velkého množství pájky k vytvoření vlny, které smáčí celý povrch desky plošného spoje. Ostatní metody nanesou malé množství pájky na požadované místo a zahřejí buď hromadně, nebo jednotlivě a proto jsou méně náročné na spotřebu a množství materiálu.

Časově nejnáročnější je pájení ruční, protože jednotlivé spoje jsou pájeny jeden po druhém, pájka se v každém spoji ohřívá z pokojové teploty nad bod tání, aby vznikl spoj mezi součástí a deskou.

Závěr

Pájení ve výrobě v elektronice zůstane. I přes to, že je zde alternativa vodivých lepidel, pájení je efektivnější, levnější, technologicky oskoušené a s dlouhodobější výdrží.

Pro kusové pájení je efektivní ruční pájení nebo pájení vlnou. Nejefektivnější je pájení horkým vzduchem, infračerveným zářením nebo pájení v parách.

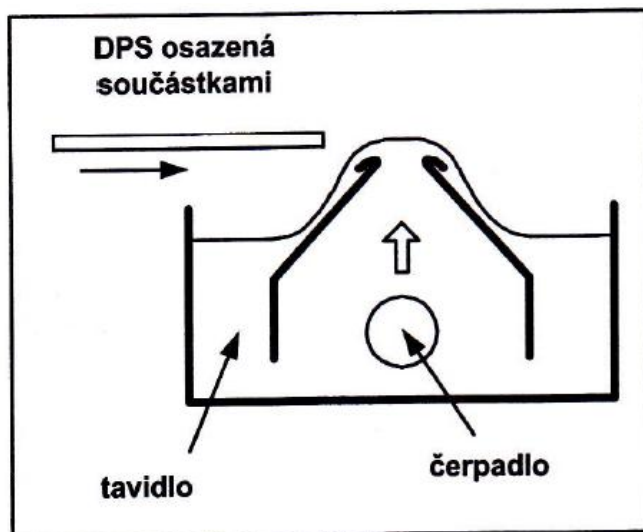
Pro hromadnou výrobu je efektivní pájení vlnou, pájení v parách, pájení infračerveným zářením, pájení horkým vzduchem. Nejefektivnější je pájení laserem a pájení impulsní.

Univerzální metodou pájení pro malé množství desek stejného typu i pro hromadnou výrobu jsou metody, kde se ohřívá celá deska najednou. Tedy pájení vlnou, pájení infračerveným zářením, pájení v parách a pájení horkým vzduchem.

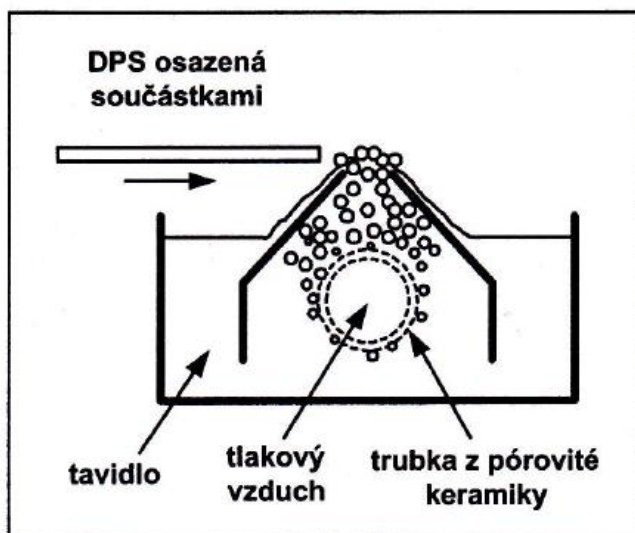
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MACH Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3
- [2] *Bipolární rovnovážné diagramy: Učební text* [online]. FMMI, VŠB-TU Ostrava, 2007 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://katedry.fmmi.vsb.cz/637/soubory/P3-binary2.pdf>
- [3] *Legislativa* [online]. [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://www.kirsten.cz/legislativa.html>
- [4] *VUTBR: BP - Optimalizace procesu strojního pájení vlnou* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18283
- [5] *SMT Centrum: Pryskeřičná tavidla na bázi kalafuny* [online]. 2010 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyber-tavidel/pryskyricna-tavidla-na-bazi-kalafuny/>
- [6] *UTB: BP - Technologie pájení přetavením* [online]. Zlín, 2010 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/11540/fil%C3%A1kov%C3%A1_2010_bp.pdf?sequence=1
- [7] *BQCable: Ovíjené spoje* [online]. [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: http://cz.bqcable.com/page/head_menu/2381/Ovijene-spoje
- [8] *Svařování* [online]. [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/~mkormund/P232/Svarovani.pdf>

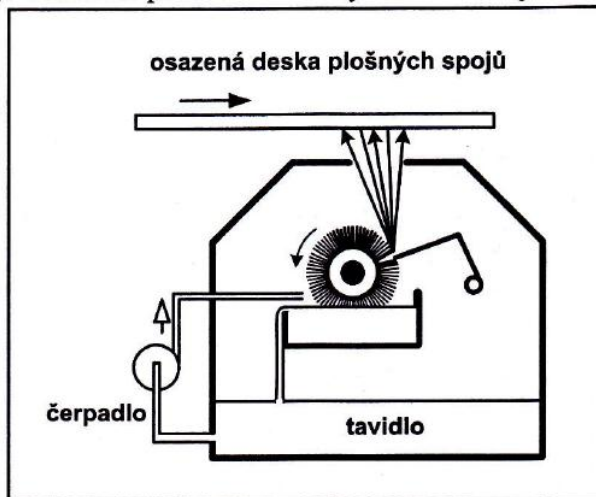
Přílohy



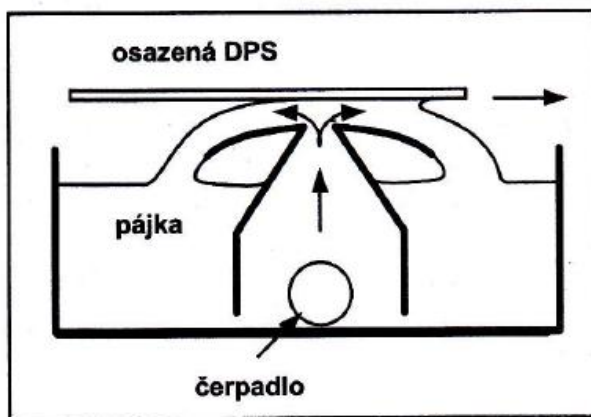
Obr.1. 1 Nanesení tavidla vlnou[1]



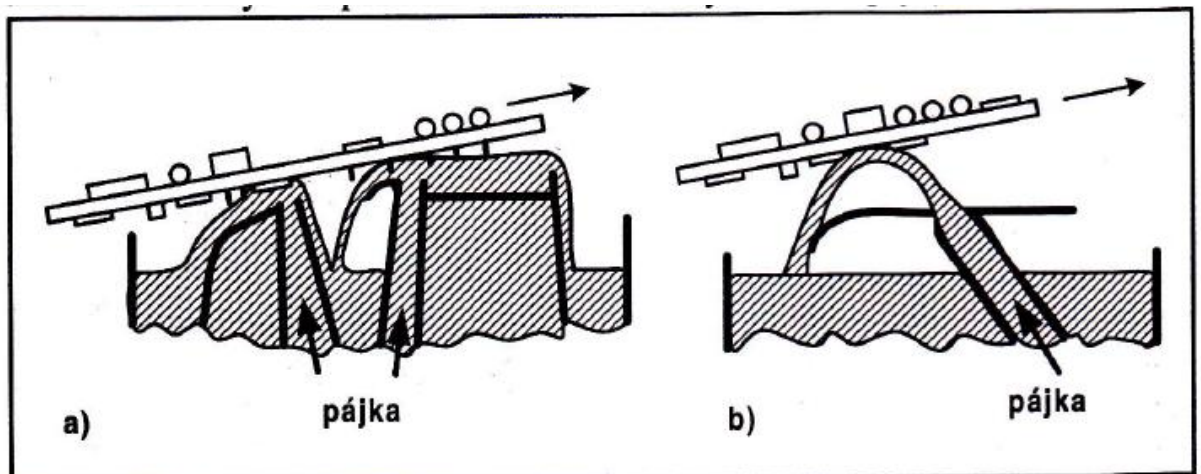
Obr.1. 2 Nanesení tavidla napěněním[1]



Obr.1. 3 Nanesení tavidla nástřikem[1]



Obr.1. 4 Pájení vlnou[1]



Obr.1. 5 Pájení vlnou a) dvojitou b) dutou[1]