

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Technologie pájení a vodivého lepení v elektronice

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaroslav FRANKO**
Osobní číslo: **E12B0303P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Technologie pájení a vodivého lepení v elektronice**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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


1. Seznamte se s technologií propojování součástek a substrátů.
2. Vypracujte přehled používaných druhů pájení.
3. Popište technologii vodivého lepení v elektronice a její vlastnosti.
4. Porovnejte z různých hledisek používané techniky propojování a popište jejich výhody a nevýhody.

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

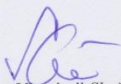
1. P. Mach, V. Skočil, J. Urbánek Montáž v elektronice
2. R. J. Klein Wassink Soldering in electronics
3. Internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Hirman**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace:

Bakalářská práce na téma „Technologie pájení a vodivého lepení“ popisuje veškeré podmínky a vlastnosti pro kvalitní pájení a lepení. Do tohoto tématu jsem se rozhodl zařadit podmínky pro vznik kvalitního vodivého spoje, veškeré metody pájení, kontrolu osazených a zapájených desek plošného spoje a v neposlední řadě vodivé lepení. Na závěr obě metody porovnat a napsat zhodnocení.

Klíčová slova:

Ruční pájení, pájení vlnou, pájení přetavením, pájecí slitina, vodivé lepidlo, vlna, pájitelnost, smáčení, cín, olovo, stříbro, měď, tavidlo, metoda, pasta

Abstract:

This Bachelor thesis on subject „Technology of soldering and conductive adhesive in electronics“ describes all conditions and properties for quality soldering and bonding. Into this topic I've decided to include conditions for the creation of quality conductive joint, all soldering methods, control of assembled and soldered printed circuit boards and conductive bonding. Finally I've compared both methods and I've written conclusion.

Key words:

Hand soldering, wave soldering, reflow soldering, solder alloy, conductive adhesive, wave, solderability, wetting, tin, lead, silver, copper, flux, method, paste

Prohlášení:

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

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

.....

V Plzni dne 24.5.2016

Jaroslav Franko

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Hirmanovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	10
1 HISTORIE PÁJENÍ A LEPENÍ	11
2 PÁJENÍ	12
2.1 PODMÍNKY PRO MONTÁŽ PÁJENÉHO SPOJE	12
2.1.1 Smáčivost spojovaných materiálů	13
2.1.2 Povrchová úprava pájených ploch	13
2.1.3 Teplotní odolnost vývodů.....	13
2.2 TAVIDLA	14
2.2.1 Tavidla rozpustná rozpouštědlem.....	15
2.2.2 Tavidla rozpustná ve vodě.....	16
2.3 KRITÉRIA PRO PÁJENÝ SPOJ	17
2.3.1 Kontaktní smáčecí úhel.....	17
2.3.2 Spolehlivost pájeného spoje	18
2.3.3 Mechanické a tepelné namáhání	18
2.3.4 Životnost a stárnutí materiálu	19
2.4 ZKOUŠKY PÁJITELNOSTI SOUČÁSTEK	20
2.4.1 Ponořovací test.....	21
2.4.2 Metoda smáčecích vah	21
2.4.3 Kuličkový test.....	23
2.4.4 Roztékavost pájecí slitiny	23
2.5 PROBLÉMY PŘI PÁJENÍ	24
2.5.1 Oxidace.....	25
2.5.1 Můstky pájecí slitiny.....	25
2.5.2 Kontaminace.....	25
2.5.3 Tombstoning	26
3 METODY PÁJENÍ	27
3.1 RUČNÍ PÁJENÍ	27
3.1.1 Transformační páječka	29
3.1.2 Pájecí stanice.....	29
3.2 STROJNÍ PÁJENÍ VLNOU	30
3.2.1 Konstrukce vlny	31
3.2.2 Jednoduchá vlna	33
3.2.3 Dvojitá vlna	33
3.2.4 Dutá vlna	34
3.3 PÁJENÍ PŘETAVENÍM.....	35
3.3.1 Nanášení pájecí pasty.....	35

3.4	KONVEKČNÍ PÁJENÍ	36
3.5	KONDENZAČNÍ PÁJENÍ.....	37
3.6	PÁJENÍ INFRAČERVENÝM ZÁŘENÍM	38
3.7	PÁJENÍ LASEREM	39
3.8	KONTROLA A TESTOVÁNÍ OSAZENÍ DPS.....	39
4	ELEKTRICKY VODIVÁ LEPIDLA	41
4.1	IZOTROPNÍ LEPIDLA	42
4.2	ANIZOTROPNÍ LEPIDLA	43
4.2.1	<i>Technologie ACF</i>	43
4.2.2	<i>Technologie ACP</i>	44
4.3	ZÁSADY PRO APLIKACI LEPIDEL	44
5	POROVNÁNÍ PÁJENÍ A VODIVÉHO LEPENÍ	46
	ZÁVĚR	47
	POUŽITÁ LITERATURA.....	49
	SEZNAM OBRÁZKŮ	55
	SEZNAM TABULEK.....	55

Seznam symbolů a značek:

ACF.....	Anisotropic conductive film
ACP.....	Anisotropic conductive paste
CO ₂	Oxid uhličitý
COB	Chip on board
DPS	Deska plošného spoje
ECA	Electrically conductive adhesive
Fe ₂ O ₃	Oxid železitý
IO	Integrovaný obvod
IR	Infrared
LCD	Liquid crystal display
mm	Milimetr
Ni	Nikl
NiCr	Sloučenina Nikl-Chróm
Pd	Palladium
RA.....	Rosin fully activated
RFID	Radio Frequency Identification
RH.....	Relative humidity
RMA	Rosin mildly activated
s.....	Sekunda
SMD.....	Surface mount device
UV.....	Ultraviolet
μ _R	Relativní permeabilita
Ω	Ohm

Úvod

Tato bakalářská práce popisuje metody propojování součástek v elektrotechnice, které se v dnešní době využívají nejvíce. Jedná se o metody pájení a vodivého lepení.

Práce je rozdělena na tři hlavní části. První část popisuje problematiku pájení, kde jsou popsány podmínky pro vznik pájeného spoje, dále jsou také probrána témata, jako je smáčivost, či teplotní odolnost. První část práce také obsahuje okruh, do kterého spadají tavidla a problémy, které se mohou vyskytnout při pájení. V neposlední řadě jsou zde zmíněna kritéria pro vznik kvalitního spoje a zkoušky, díky kterým zjistíme, jak kvalitní byl proces pájení.

V druhé a třetí části se čtenář dozví potřebné informace o procesu pájení, konkrétně o metodách pájení a technologii vodivého lepení. Mezi základní metody pájení patří ruční pájení, pájení vlnou a pájení přetavením. V technologii vodivého lepení jsou popsány základní metody používání lepidel, včetně rozdělení.

Cílem této práce je seznámit se s procesem propojování součástek v elektrotechnice, včetně substrátů, vypracovat používaný přehled metod pájení, popsat technologii vodivého lepení a v neposlední řadě obě metody porovnat.

1 Historie pájení a lepení

Historie pájení/svařování se vztahuje do doby, kdy vznikalo zpracování barevných kovů a železa. Zhruba 3000 let před naším letopočtem se egyptští zlatníci naučili spojovat zlato tzv. tvrdým pájením. Měkké pájení začalo vznikat až 2000 let před naším letopočtem. Tehdy se takto spojovali dohromady například olověné vodovodní trubky. Základní rozdíl mezi pájením a svařováním je ten, že u pájení se netaví základní materiál, ale pouze materiál, který je jako přídavný (pájecí slitina). Ten pak difunduje do základního materiálu a vytváří spoj. Svarový spoj vzniká na základě působení tepla a tlaku na materiál. Železné kovy se začaly spojovat za využití kladiva a výhně. Tehdy se tomu říkalo tzv. kovářské svařování. Tato tehdy nová technologie se postupně velice rychle rozrostla po objevení nových zdrojů tepelné energie. Jedním z nových zdrojů v oblasti tepelné energie je tzv. elektrický oblouk, kterému se u nás využilo prvně přibližně v roce 1900 ve Vítkovicích a v Plzni. Další, v dnešní době stále využívaný typ svařování je technologie svařování za pomoci kyslíkoacetylénového plamenu (tzv. „autogen“). [1], [2]

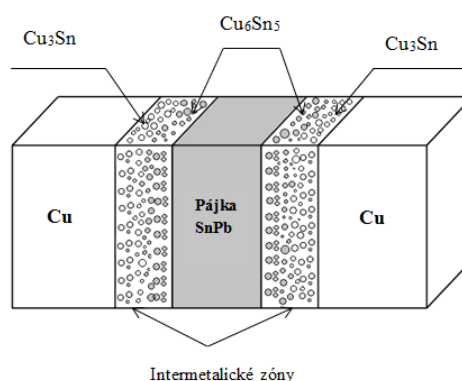
Samozřejmě stojí za zmínku, že pájení se začalo používat jako náhražka spojování materiálů šrouby a nýty, jelikož to bylo velice drahé. Speciálně u nýtování rozhodla druhá světová válka, kde Rusko dokázalo, že svařování materiálu jako takové, je daleko rychlejší. Co se týče pájení, jako samostatného okruhu spojování materiálu, je zcela důležité říct, že pájení patří k jedné z nejdůležitějších částí výrobního procesu, výrobního procesu elektronických zařízení. Má zásadní vliv na kvalitu výsledného přístroje (zařízení), proto je důležité zajistit důslednou kontrolu pájených spojů. [1], [2]



Obrázek 1: Historická páječka, převzato z [1]

2 Pájení

Pájení je proces, kdy se dvě, nebo více částí spojují roztaveným kovem neboli pájecí slitinou. Tato pájecí slitina musí mít samozřejmě nižší teplotu tavení, než jsou spojované části, které jsou umístěné na desce plošného spoje, nebo kdekoli jinde, kde se tyto části potřebují spojit. Jedná se o nerozebíratelné spojení. Toto spojení funguje na principu styku povrchových atomů základního materiálu a atomů roztavené pájky v dostatečné vzdálenosti, aby vznikly podmínky pro účinek adhezních a kohezních sil (adheze = přilnavost a koheze = soudržnost). [3], [4]



Obrázek 2: Pájený spoj[4]

Pájené spoje jsou v elektrotechnice nejčastěji realizovány za pomoci měkkých pájecích slitin, což znamená, že teplota tavení pájecí slitiny je pod 500°C . Naopak tvrdé pájecí slitiny mají teplotu tavení nad 500°C . U měkkých pájecích slitin se jedná o slitinu, která je vyhovující jak z hlediska ceny, tak z hlediska elektrických a především mechanických vlastností. Jak už je zmíněno v úvodu, dlouho byly používány pájecí slitiny SnPb, které ovšem přestaly plnit především ekologickou stránku výroby (především jsou podle evropské legislativy až na výjimky zakázané) a nyní se začaly nahrazovat ekologičtějšími slitinami, které neobsahují olovo. U olova je známé, že jakmile se dostane do lidského těla vyšší koncentrace olova, dochází k silné otravě. Naopak při nižším množství může dojít k nervovým poruchám, nebo k poškození vědomí, či ušního systému. [3], [4]

2.1 Podmínky pro montáž pájeného spoje

Pro vytvoření kvalitního pájeného spoje, je třeba, aby byly vytvořeny podmínky pro pájitelnost vývodů součástek i připojovacích plošek. K tomu, aby takovéto podmínky mohly být vytvořeny, musí být splněny následující podmínky: [4]

2.1.1 Smáčivost spojovaných materiálů

Při pájecím procesu nestačí pouze nahřát páječku a přidat pájecí slitinu. Důležitým prvkem v celém procesu je zajistit správnou pájitelnost. Tento termín si můžeme popsat jako schopnost materiálu být smáčitelný (pájecí slitinou) během procesu pájení. Smáčivost je schopnost povrchu podporovat vytvoření slitiny na rozhraní materiálu a pájecí slitiny, díky které se vytvoří mechanicky odolný a zároveň elektricky vodivý spoj s nízkým elektrickým odporem. [5], [6]

Stupně smáčení:

a) Nesmáčení:

Rozhraní mezi pájkou a povrchem zůstane zřetelně zachováno. Může to být způsobeno tavidlem, které je málo aktivní, což by způsobilo, že povrchové znečištění bylo špatně odstraněno, nebo tím, že je oxidační vrstva silnější, než by být měla. [5], [6]

b) Smáčení:

Povrchová energie čistého povrchu je vyšší, než roztavené pájky, což zaručí, že na rozhraní vznikne tzv. „metalurgická vazba“. Pájka smočí povrch a vytvoří se tak na rozhraní kvalitně vodivá vazba. Jak smáčení postupuje, tak roste na rozhraní tenká vrstva, které vytváří základ vodivého spoje. [5], [6]

c) Odsmačení:

Tento stupeň nastává tehdy, kdy rozžhavená pájka po pokrytí povrchu postupně ustupuje a nechává za sebou nepravidelné tvary (většinou kopečky), které jsou mezi sebou odděleny tenkou vrstvou pájky. Samozřejmě se může odsmačení vyskytnout i zespoda, od pájeného místa. Ve většině případů to nastane při pájení kontaktních ploch drahých kovů, které se velmi rychle rozpouští na SnPb pájce. [5], [6]

2.1.2 Povrchová úprava pájených ploch

Tato podmínka splňuje funkci kontroly pájeného spoje, kde se kontroluje spoj tak, aby pokovení vývodů i plošek v čase, kdy je pájení prováděno, nebylo v pájecí slitině rozpuštěno, nebo pájkou odplaveno. [4]

2.1.3 Teplotní odolnost vývodů

Tato definice popisuje, že při této kontrole nesmí maximální teplota vývodů, plošek, desek plošného spoje, nebo pouzder poškodit v době, kdy je prováděno pájení,

součástky, nebo desku plošného spoje. Takové poškození může vzniknout, když si představíme například diodu, kterou potřebujeme připájet na DPS za pomoci ruční páječky, dlouhým držením ruční páječky na diodě, na kterou v tu chvíli působí obrovské teplo a právě toto teplo může poškodit součástku, kterou potřebujeme na DPS umístit. [4]

Tabulka 1: Tabulka teplot pro ideální ruční montáž/demontáž pájeného spoje, převzato z [4]

Položka	Teplotní kritéria
Maximální teplota uvnitř součástky	220 °C
Teplota uvnitř teplotně citlivé součástky (max.)	150 °C
Rychlost přehřevu teplotně citlivých součástek	2–5 °C/s
Maximální teplota na přilehlých pájených spojích	150 °C
Vytvoření spájeného spoje	220 °C po 2–4 sec
Chlazení pájeného spoje (rychlé)	100 °C za 5 sec
Ohřev DPS	125–150 °C
Teplota přehřevu (max.)	125 °C
Teplota pájecího hrotu (max.)	385 °C

2.2 Tavidla

Tavidlo má během procesu pájení dvě základní funkce. První funkcí je zlepšení smáčitelnosti pájeného spoje. Tou druhou je viskozita. Viskozita je velice důležitá funkce, jelikož velmi ovlivňuje kvalitu pájeného spoje při nanášení pájecí pasty. Zatímco tekutá pájecí pasta by se při nanášení tavidla roztékala a zhoršovala by kvalitu pájeného spoje, tužší pasta by se obtížně nanášela. Pokud je tavidlo schopno odstraňovat oxidy z povrchu, nazývá se tzv. aktivní tavidlo. Za běžných teplot by tavidlo mělo mít nízkou aktivitu. Aktivní by mělo být pouze za teplot, při kterých je prováděno pájení.[8]

Tabulka 2: Klasifikace tavidel podle normy EN 9454-1, převzato z [8]

Klasifikace tavidla			Kód	
Typ tavidla	Základ tavidla	Aktivace tavidla		
Pryskyřičná	1. Kalafuna	1. Bez aktivátorů	1.1.1	
	2. Nekalafunová pryskyřice	2. Halogeny	1.2.1	
		3. Nehalogenové aktivátory		1.1.2
				1.2.2
				1.1.3
		1.2.3		
Organická	1. Vodou ředitelná	1. Bez aktivátorů	2.1.2	
	2. Vodou neředitelná	2. Halogeny	2.1.3	
		3. Nehalogenové aktivátory		2.2.2
				2.2.3
Anorganická	1. Soli	1. S chloridem amonným	3.1.1	
		2. Bez chloridu amonného	3.1.2	
	2. Kyseliny	1. Kyselina fosforečná	3.2.1	
		2. Jiné kyseliny	3.2.2	
	3. Alkálie	1. Aminy nebo amoniak	3.3.1	

Tavidla mohou být rozdělena na dvě základní kategorie:

1. Tavidla rozpustná rozpouštědlem

- Tavidla na bázi kalafuny
- Syntetická tavidla

2. Tavidla rozpustná ve vodě

2.2.1 Tavidla rozpustná rozpouštědlem

Tato tavidla jsou založena na pryskyřici, která je známá jako „kalafuna“. Přestože se jedná o velmi slabé činidlo, přidávají se k ní další přísady ke zvýšení aktivity tavidla. [8]

- **Pryskyřičná tavidla na bázi kalafuny** můžeme rozdělit následovně: [8]

1. Typ R
2. Typ RMA (Pryskyřičné tavidlo s aktivátory)
3. Typ RA (Pryskyřičné tavidlo s větší účinností aktivátorů)
4. Typ RSA

- **Typ R (Rosin)**

Jedná se o tavidlo, které má nejnižší aktivitu a skládá se z čisté bílé pryskyřice (kalafuna) rozpouštěné v lihovém ředidle. Ačkoliv má toto tavidlo relativně slabou čistící schopnost, používá se na vysoce pájitelné povrchy. Je vhodné pro povrchy s dobrou

pájitelností. Při pokojové teplotě je tavidlo neaktivní a elektricky nevodivé, tudíž nemusí být po pájení odstraněno. [8], [9]

- **Typ RMA (Midly activated rosin)**

Základ tavidla s označením RMA zůstává stejný jako u typu R, ale s tím, že je do něj přidáno více aktivátorů pro větší aktivitu. Není nutné toto tavidlo po pájecím procesu odstraňovat, ale je velmi důležité brát ohled na to, že přidané aktivátory jsou vázány v pryskyřici, tudíž po nedokonalém odstranění zbytků tavidla může vznikat koroze. [8], [9]

- **Typ RA (Activated rosin)**

Příměsi v těchto tavidlech jsou daleko agresivnější, než u dosud zmiňovaných tavidel. Jelikož mají zvýšenou aktivitu, je důležité tyto tavidla vždy odstranit po pájecím procesu. Zbytky tavidla na DPS by mohly podpořit průběh koroze, zvláště ve vlhkém prostředí. [8], [9]

- **Typ RSA (Superactivated rosin)**

Tento typ tavidla je vysoce agresivní a je nezbytně nutné odstranit po pájecím procesu veškeré jeho zbytky. [8], [9]

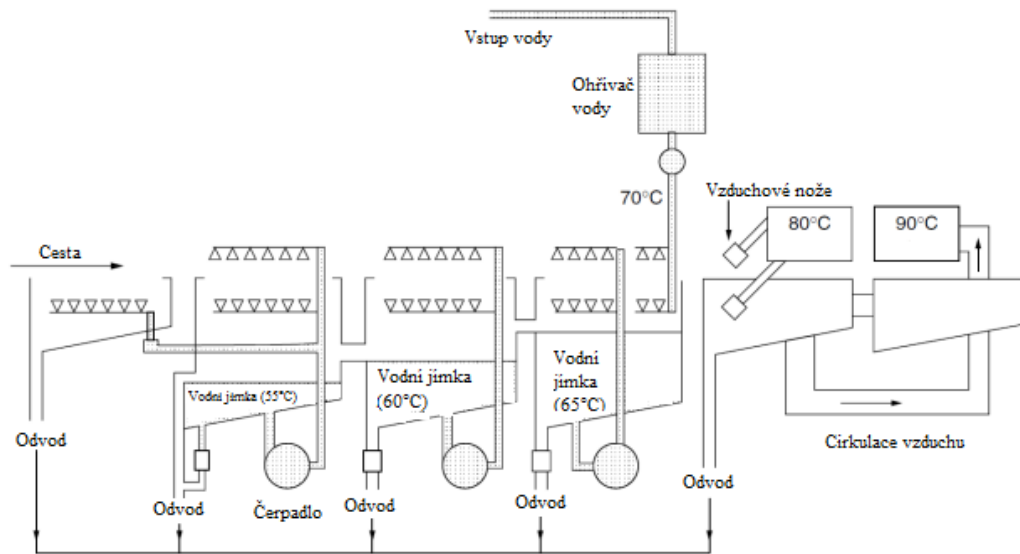
- **Syntetická tavidla**

Je velmi těžké získávat pryskyřici, která má neměnné podmínky, jelikož správné složení se mění podle geografického umístění a klimatických podmínek. Syntetická tavidla byla vyvinuta z důvodu eliminovat problémy pryskyřičných tavidel, které jsou převážně v polymerizaci pryskyřice během pájecího procesu, což vede k zanechávání zbytků. Syntetická tavidla podléhají přísným normám a musí procházet důslednou kontrolou. Skládají se z fosfátových směsí, které jsou v kombinaci s dalšími příměsemi. [8], [9]

2.2.2 Tavidla rozpustná ve vodě

Jedná se o tavidla, kterými jsou typicky organické kyseliny, které se vyznačují daleko vyšší aktivitou, než pryskyřičná tavidla. Důležité u těchto tavidel bývá, odstranit je po pájecím procesu vodou. Jak už název napovídá, nejlépe se kyseliny očišťují ve vodním procesu. Z toho vyplývá, že proces čištění u těchto tavidel je velmi levný, jelikož se používala obyčejná voda. Důležité je zmínit, že díky těmto tavidlům se

dosahuje bezproblémového pájení. Na obrázku č.3 je uveden příklad linky pro oplach DPS. [8], [9]

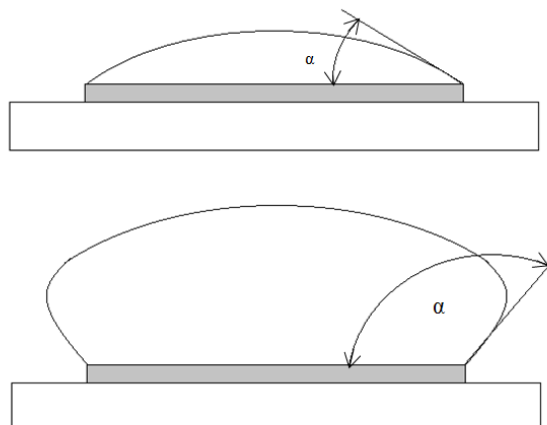


Obrázek 3: Příklad systému pro čištění desek za pomoci vody převzato z [8]

2.3 Kritéria pro pájený spoj

2.3.1 Kontaktní smáčecí úhel

Důležitým kritériem pro vytvoření kvalitního pájeného spoje je tzv. kontaktní úhel. Tento úhel vzniká mezi pájecí slitinou a pájenou plochou. Pohybuje se v rozmezí mezi 0-180°. Čím menší je úhel smáčení, tím lepší je smáčivost. [10]



Obrázek 4: Stykový úhel pro smáčivý a nesmáčivý spoj [10]

Smáčecí úhel si můžeme rozdělit do několika kategorií, podle velikosti úhlu α : [10]

- $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ = Velmi dokonalé, až výborné smáčení
- $20^\circ < \alpha < 40^\circ$ = Dobré až velmi dobré smáčení
- $40^\circ < \alpha < 55^\circ$ = Smáčení, které je ještě postačující
- $55^\circ < \alpha < 90^\circ$ = Špatné smáčení
- $90^\circ < \alpha$ = Nesmáčivý spoj

2.3.2 Spolehlivost pájeného spoje

Pojmem „spolehlivost“ rozumíme časový úsek, během kterého je zaručena kvalitní a zároveň spolehlivá vodivost spoje. Spolehlivost může být posuzována z několika hledisek, avšak nejdůležitější je životnost materiálu. Mezi základní faktory, které se posuzují patří: [11]

- Mechanické a tepelné namáhání
- Životnost a stárnutí materiálu

Spolehlivost pájeného spoje se skládá z více částí, samozřejmě největší podíl má pájecí slitina ($\pm 75\%$), dále kontaktní plocha substrátu (15-20%) a v poslední řadě záleží také na vývodu součástky (5-10%). [11]

2.3.3 Mechanické a tepelné namáhání

Mechanické namáhání má největší vliv na pájecí slitinu, která postupem času projevuje mechanické stárnutí, tím pádem se zhoršují vlastnosti a může dojít k mechanickému porušení spoje. Rozlišujeme dva typy mechanického namáhání. Tím prvním typem je namáhání externí, což mohou způsobovat vibrace, či nějaké jiné venkovní vlivy. Druhým typem namáhání je interní. Pojmem interní namáhání se rozumí namáhání spoje, při kterém se mění struktura vnitřních poměrů. Mechanické namáhání závisí na mnoha faktorech. Jedním z faktorů může být i tvar vývodů součástek. Jen pro představu, například drátkové vývody snižují mechanické namáhání více, než vývody u SMD kontaktů. [11]

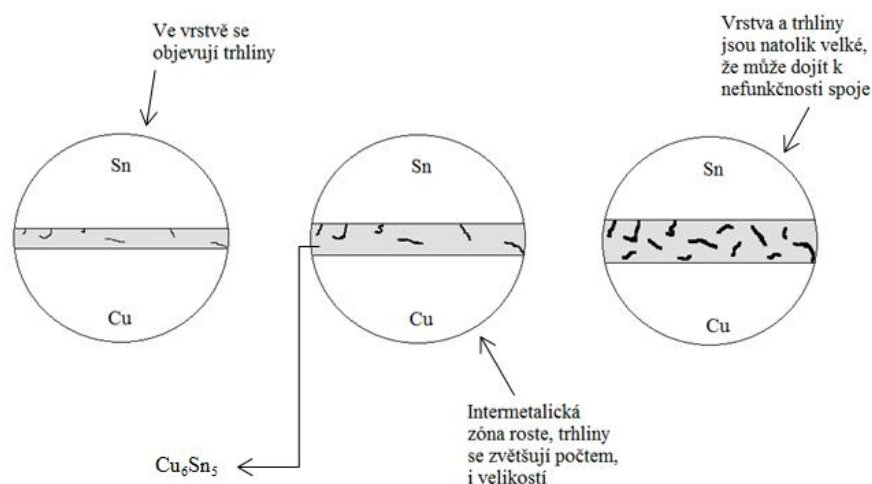
Teplotní namáhání vzniká, když teplo velmi působí na pájený spoj. Zdrojem tepla může být buď okolí, nebo i samotný obvod. Teplo, působící na pájený spoj způsobuje vratné, ale i nevratné jevy. Mezi vratné jevy patří například roztahování

materiálu, průhyby, nebo změna rozměrů. Mezi nevratné jevy může patřit právě životnost (stárnutí) materiálu. [11]

2.3.4 Životnost a stárnutí materiálu

Stárnutí materiálu závisí zejména na difuzní vrstvě, která vzniká mezi cínem a mědí. Difuzní vrstva pracuje především za přítomnosti tepla. Během několika procesů narůstá, zvětšuje svou tloušťku, případně zvyšuje elektrický odpor spoje. Nadměrný růst difuzní vrstvy může být způsoben už na začátku celého procesu (při ohřevu). Difuzní vrstva je tvořena tzv. intermetalickou zónou, která je nejčastěji tvořena slitinou Cu_6Sn_5 , nebo i dalšími slitinami. Tloušťka zóny se pohybuje řádově v jednotkách μm , ovšem může dosahovat velikosti až několika desítek μm . [11]

Životnost se pohybuje v řádech několika desítek let, ale i přesto se dělají zkoušky (tzv. zrychlené) díky kterým se zjišťuje kvalita celého spoje. Během zkoušek se provádí simulace pracovního režimu při zvýšené teplotě, nebo střídání teplot ze záporných do kladných a naopak. Zkoušky mohou být doplněny i o simulaci vlhkého prostředí. Schématicky je tato simulace vyjádřena v obrázku č. 5. [11]



Obrázek 5: Průběh stárnutí v intermetalické zóně Cu_6Sn_5 [11]

- **Proces difuze**

Tento fyzikální jev je možné pozorovat u jakýchkoliv částic. Nezáleží, jestli má částice elektrický náboj, důležité naopak je, že můžeme sledovat pohyb částic, který je spíše neuspořádaný a je způsoben působením tepla. Z určitého hlediska můžeme tento pohyb popsat tak, že se částice přemísťují z míst s vyšší koncentrací do místa s nízkou koncentrací. Jakmile se po celém objemu koncentrace nábojů vyrovná, tento proces

dosáhne svého účelu a přestane fungovat. Molekuly se pohybují na bázi tzv. Brownova pohybu, což znamená, že se jedná o neuspořádaný pohyb částic. [12]

- **Proces koroze**

Pod pojmem koroze je třeba si představit samovolné působení prostředí a daného materiálu. Koroze bohužel ve většině případů znehodnocuje materiál. Koroze může působit i na jiné materiály, nejen kovy a jejich slitiny. Objevuje se u anorganických, ale i organických materiálů. Znehodnocení materiálů může mít více významů. Koroze může způsobit nejen změnu vzhledu, ale může vést prakticky až k rozpadu. [14]

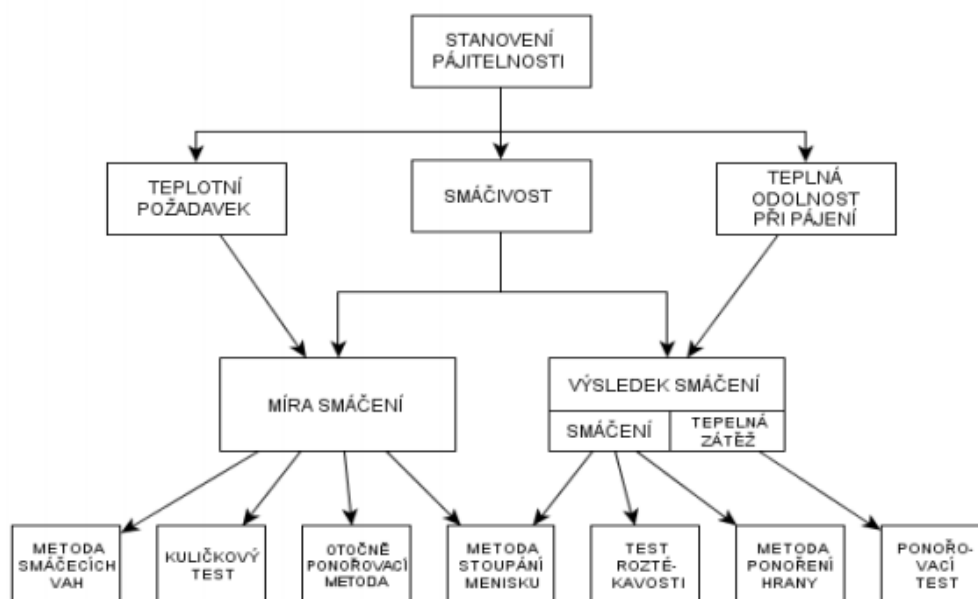
2.4 Zkoušky pájitelnosti součástek

Zkoušky pájitelnost se dají rozdělit na dvě hlavní skupiny. První skupina zkoušek se zaměřuje na předpověď pro určitou skupinu součástek. Tyto zkoušky dokáží odhadnout, jak moc kvalitní bude pájitelnost součástek ve výrobě. Druhá skupina zkoušek se zaměřuje především na materiály vývodů a výrobní procesy. [10]

Dále by šlo rozdělit zkoušky také na kvalitativní a kvantitativní zkoušky. Kvalitativní zkoušky slouží především k vizuální kontrole (např. ponořovací test), naopak kvantitativní zkoušky zkoumají fyzikální vlastnosti především při smáčení. [10]

Mezi nejdůležitější zkoušky patří:

- Ponořovací test
- Metoda smáčecích vah
- Kuličkový test
- Test roztékavosti



Obrázek 6: Diagram metod zkoušek pájitelnosti, převzato z [10]

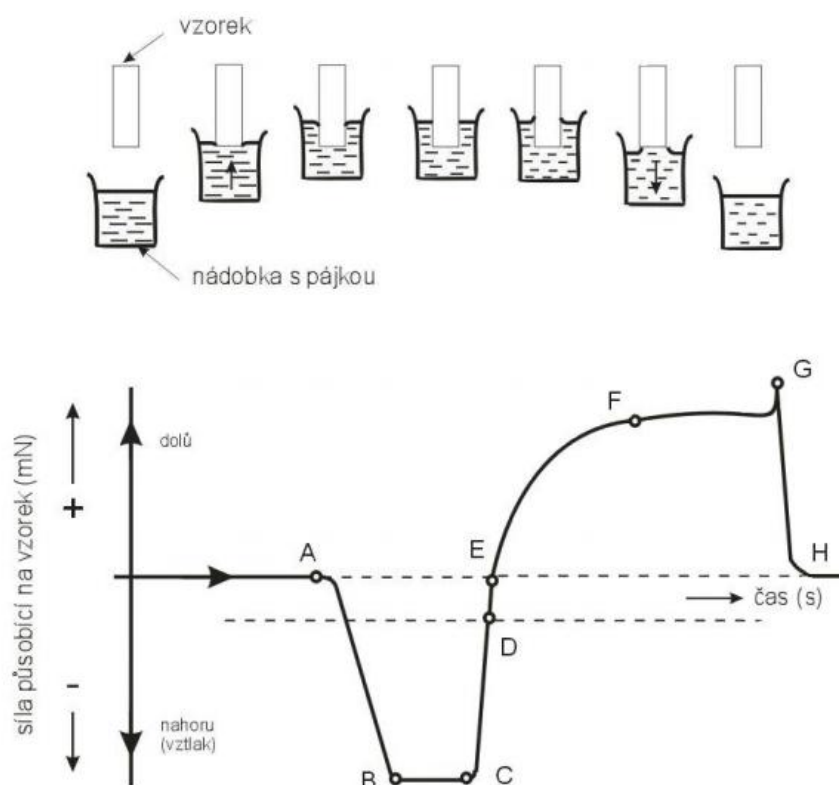
2.4.1 Ponořovací test

Jedná se o nejjednodušší test, jak zjistit pájitelnost kontaktů, či přímo vývodů. Tento test spočívá v ponoření vzorku do pájecí lázně po daný časový interval. Po vytažení se výsledek hodnotí vizuální kontrolou. Jak už bylo zmíněno, tento test závisí pouze na kontrole odpovědného pracovníka, tudíž není přesný. [9], [10]

2.4.2 Metoda smáčecích vah

Je to univerzální metoda pro měření potřebných vzorků dané velikosti. Pomocí této metody vyšetřujeme nejen smáčivost povrchu, ale i pájitelnost vzorků, či případné testování tavidel. [10], [15]

Nad nádobou s roztavenou pájecí slitinou je umístěn velmi citlivý siloměr, do kterého je pevně umístěn vzorek. Pomocí zvedáku, který má určenou rychlost se pozvolna začne nádoba naplněná pájecí slitinou zvedat až do chvíle, kdy se měřený vzorek potopí do roztavené pájecí slitiny. Vzorek je po danou dobu v nádobě ponořen. Po chvíli začne nádoba klesat a vzorek zůstane vynořen. Na ponořený vzorek neustále působí vztlaková síla. Rychlost zdvihu a poklesu lze ovládat, přes ovládání zařízení, pomocí kterého lze nastavit i teplotu pájecí slitiny. Výsledný graf ukazuje závislost síly v daném čase. Tento přístroj se nazývá meniskograf. [10], [15]



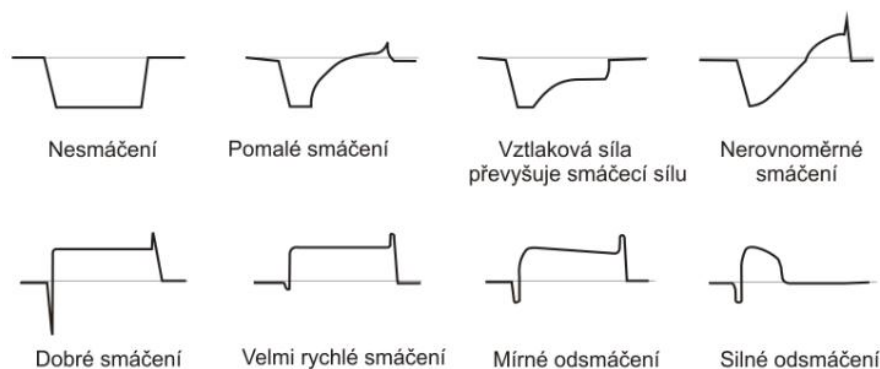
Obrázek 7: Křivka rovnováhy metody smáčecích vah, převzato z [15]

Tato charakteristika je platná pro válcový vzorek. Místo označené bodem A značí místo styku vzorku s pájecí slitinou. Prudký sklon mezi body A a B je dán rychlostí ponoření vzorku. V bodě C se vzorek začíná smáčet. Mezi body C a F se mění síla působící na vzorek. Bod, který leží na této křivce = bod D značí, že je povrch pájecí slitiny kolmý na měřený vzorek. Síla v bodě D je rovna vztlakové síle, naopak v bodě E je síla rovna nule, jelikož jsou všechny síly v rovnováze. Předposlední bod G je vrcholem celé křivky a ukazuje, kdy je vzorek kompletně vytažen z lázně. Bod H už je konečná stav celého procesu. Díky tomuto měření dokážeme s velkou přesností určit smáčitelnost, která je poměrně důležitá. [10], [15]

Pájitelnost lze vypočítat ze vztahu:

$$S = \frac{\text{Smáčecí síla ve 2. sekundě}}{\text{Maximální vytahovací síla} \cdot \text{Doba celého smáčecího procesu}} \quad (1)$$

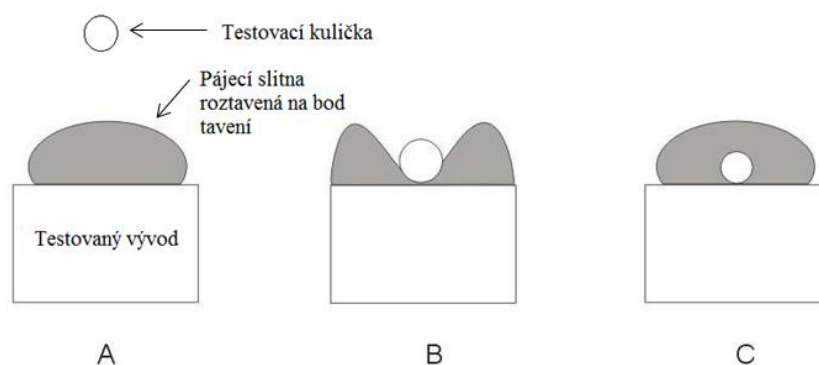
Z praxe je známo, že nejlepší pájitelnost nastává, když hodnota S je 5 – 6. Pro hodnoty, které jsou nižší, už nastává proces odsmáčení. [10], [15]



Obrázek 8: Příklady různých průběhů smáčecích sil, převzato z [15]

2.4.3 Kuličkový test

Dle obrázku č. 10, který celý test popisuje je zřejmé, že se pájecí slitina, která je rozehrátá na bod tavení, musí po vložení testovacího vzorku rozdělit rovnoměrně na dvě poloviny a ve výsledku vlivem smáčení opět spojí dohromady. Kritériem této zkoušky je tedy čas, během kterého se dokáže roztavená pájecí slitina znovu vrátit do původního tvaru. [16]



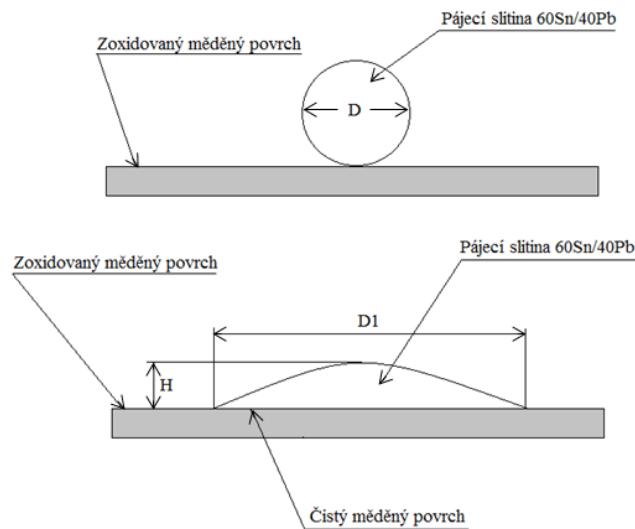
Obrázek 9: Znárodnění kuličkového testu ve třech bodech [16]

Na obrázku č. 9 je znázorněn postup kuličkového testu. Počáteční stav je znázorněn bodem A, B představuje stav, kdy je kulička umístěna do středu vývodu a C zobrazuje stav, kdy dojde ke smáčení. [16]

2.4.4 Roztékavost pájecí slitiny

Tento test nám slouží především ke zjištění aktivity tavidla, případně k zjištění roztékavosti pájecí slitiny. Celý proces této zkoušky probíhá tak, že na určený povrch, který je opatřen tavidlem se nanese dané množství pájecí slitiny. Obrázek č. 10 nám popisuje výsledek celého testu, kde zjišťujeme plochu a výšku, po které se pájka

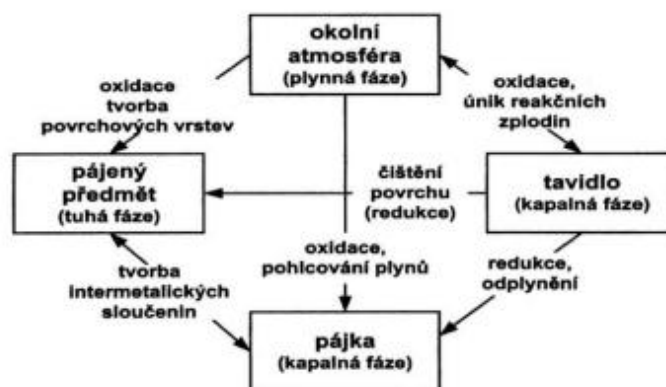
roztekla. Z výšky pak můžeme určit tzv. faktor roztékavosti, který je definován jako podíl výšky při roztečení k výšce při ideálním nesmáčení. [16]



Obrázek 10: Příklad roztékavosti, kde se pájecí slitina rozteče o určité výšce H a délce $D1$ [4]

2.5 Problémy při pájení

Základním prvkem celého pájeného spoje je životnost. Jelikož je životnost prakticky nejdůležitější kritériem, je velmi důležité provádět kontroly pájených spojů. Pájený spoj musí mít danou kvalitu, která se dá definovat jako schopnost pájeného spoje vykonávat danou funkci po danou dobu. Jinými slovy, pájený spoj musí být spolehlivý, což znamená, že po určitou dobu musí mít správnou funkčnost, jak z pohledu bezporuchovosti, tak z pohledu dobré vodivosti. Z obrázku č. 11 je vidět, jaké složky mohou způsobit chybu už na počátku celého procesu. Může se jedna například o oxidaci, můstky, znečištění atd. [17]

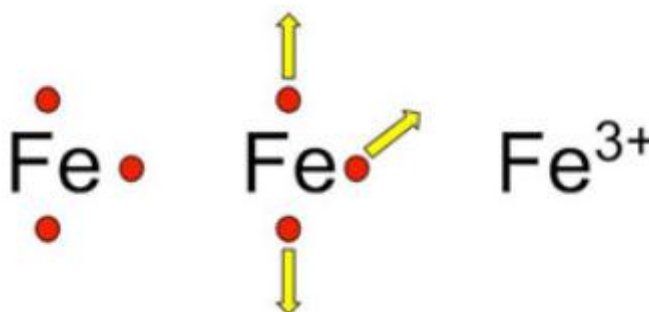


Obrázek 11: Vzájemné působení chyb, převzato z [17]

2.5.1 Oxidace

Jedna z nejčastějších chyb při procesu spojování materiálů. Oxidace vznikne uvolněním neboli ztrátou elektronů. To nastane, když atom, či sloučenina uvolní jeden, nebo více elektronů. Některé prvky mohou uvolňovat elektrony rychleji a snadněji. Takoveto prvky jsou tzv. „vysokooxidační“. Do vysokooxidačních prvků můžeme zahrnout kovy, včetně sodíku, či hořčíku. Naopak existují prvky, které si dokáží držet pevně elektrony a díky této pevné vazbě nepodléhají oxidaci. [17], [18]

Neoxidované železo působí jako pevný celek, zatímco železo, na které působí oxidace, mění svou strukturu a postupně se stává křehčí a povrch se mění v načervenalou barvu. Dle obrázku č. 12 je zřejmé, že železo ztratí postupně své tři elektrony, čímž změní svůj náboj v kladný. Všechny prvky, které podléhají korozi, je tedy lepší vystavit takovým podmínkám, kde budou minimálně podléhat vlhkosti a kyslíku. [17], [18]



Obrázek 12: Proces oxidace u železa, převzato z [18]

Oxidace nám v dalším průběhu pájecího procesu může přivodit nesčetné problémy, které se mohou ovlivnit spolehlivost finálního výrobku. [17], [18]

2.5.1 Můstky pájecí slitiny

Další z podstatných chyb, které mohou nastat, jsou právě „můstky“, nebo známější jako zkrat. Tato chyba může nastat, když pájecí slitina je nanášena do jiných cest, nebo mezi vodiči, které propojeny být nemají. Je důležité dodržovat přesné množství pájecí slitiny, které má být nanášeno. [17]

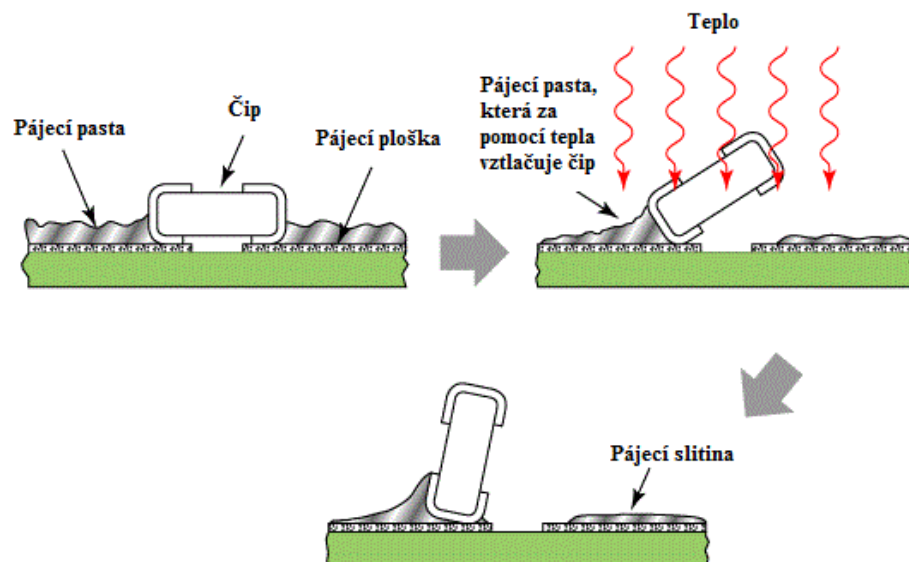
2.5.2 Kontaminace

Kontaminace, neboli znečištění je jedna z dalších variant, které dokáží snížit kvalitu výsledného výrobku. Proto je velmi důležité tyto nečistoty odstranit z DPS, aby byl povrch čistý a perfektně připravený pro pájení. Je několik druhů kontaminací, které

mohou nastat během celého pájecího procesu, mezi ně patří polární, nepolární a pevná. Polární kontaminace značně ovlivňuje velikost izolačního odporu, především za vlivu vlhka. Nejčastěji se tyto problémy mohou zjistit pomocí testerů, které jsou určeny přímo pro detekci iontové kontaminace. Naopak nepolární kontaminace vzniká důsledkem zbytků kalafuny. Je to nejčastější případ nepolární kontaminace. Bohužel v tomto případě testery nejsou schopny detekovat toto znečištění. V neposlední řadě se jedná o pevné nečistoty. Tento zástupce je nejčastěji zastoupen prvky jako například zbytky po vrtání, řezání, nebo při dalších úpravách. Bohužel je lze opravit pouze omytím DPS. [17], [19]

2.5.3 Tombstoning

Jinak také tzv. „nadvzednutí součástky“. Tento jev vzniká většinou u pájení SMD součástek. Dle obrázku č. 13 je vidět, že nadvzednutí součástky vzniká při působení tepla na pájecí pastu, která díky silám začne vtlačovat čip směrem vzhůru, tím pádem na druhém konci se součástka nadvzvedne. Důležitými parametry jsou tedy teplota a smáčivost obou pájecích plošek. Oba parametry mají přímý vliv na vytvoření tombstoningu, jelikož smáčení nesmí dosáhnout na jedné straně úplného namočení, oproti straně druhé. Teplota je ovlivňována především rozměry pájecích plošek. [20], [21]



Obrázek 13: Znázornění tombstoningu [21]

3 Metody pájení

3.1 Ruční pájení

Pájení je obecně proces, kdy se spojují dva materiály (většinou kovy) za pomoci roztavené pájecí slitiny. Vadné pájené spoje jsou jednou z hlavních příčin selhání zařízení, tedy je možné konstatovat, že pájecí proces nelze zanedbat a musí se udržovat na vysoké úrovni. V následující tabulce jsou uvedeny prvky podle chemické aktivity a hodnoty tvrdosti pro možné pokovovací materiály. Vycházíme z intermetalických reakcí. [22], [23], [24]

Tabulka 3: Relativní úrovně aktivity kovů a hodnoty tvrdosti kovů podle Brinella[22]

Kov	Aktivita	Tvrдость	
Chrom (Cr)	Relativně nejvyšší aktivita	1120	
Železo (Fe)	↓	490	
Kadmium (Cd)		203	
Kobalt (Co)		700	
Nikl (Ni)		700	
Cín (Sn)		51	
Olovo (Pb)		38	
Antimon (Sb)		294	
Bismut (Bi)		94	
Měď (Cu)		Relativně nejnižší aktivita	87

- **Chrom** je prvek, se kterým je lehká manipulace. V tabulce je výše než železo, tudíž by to byl prvek, který je vhodný pro ještě lepší smáčení. Výhodou je, že není náchylný na oxidaci, ale obrovskou nevýhodou je, že není šetrný vůči životnímu prostředí.
- **Železo** je typický prvek, který se používá pro pokovení pájecích hrotů. Je to běžný a levný prvek. Železo je měkké, tudíž se postupem času obrousí. Nevýhodou je, že při pokojových teplotách reaguje s kyslíkem.
- **Kadmium** je prvek, který je pro pokovení velmi měkký. Za běžných podmínek je možno kadmium krájet nožem.
- **Kobalt** je používaný jako namodralý povlak. Bohužel je známo, že kobalt je drahý, málo smáčivý a je velmi křehký.

- **Nikl** se vlastnostmi hodně podobá železu, ale je méně aktivní, než je samotné železo. Je to prvek, který je odolný vůči korozi.
- **Cín a olovo** se v tabulce uvádí jen pro představu, jaký vztah mají k ostatním prvkům.
- **Antimon a bizmut** jsou prvky, které jsou méně aktivní než cín, ale aktivnější než měď. Jsou to složky mnoha bezolovnatých pájek.
- **Měď**, jak už je vidět z tabulky, je velmi málo aktivní prvek. Je velmi měkká a vyžaduje ochranu, která jí chrání před chemickou reakcí.

Co se týká stupnice tvrdosti, číselné hodnoty ukazují tvrdost materiálu. Je to velmi důležitý parametr, jelikož čím tvrdší je pokovení pájecího hrotu, tím menší je možnost, že pájecí hrot bude opotřeben rychleji. Je známo, že čím tvrdší bude pokovovací materiál, tím více tavidla bude třeba, protože smáčení tvrdších prvků je menší. [22]

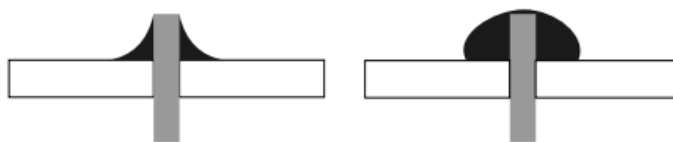
Jako první činnost, která by se měla v tomto procesu udělat je očištění pájecího hrotu. Je velmi důležité očistit pájecí hrot od zbytků pájecí slitiny, která tam mohla zůstat po předešlém pájení. Na čištění se většinou používá namočená houbička, do které se pájecí hrot otře. Dalším důležitým prvkem ručního pájení je nanést velmi malé množství pájky, aby hrot mohl vést kvalitně teplo. Ruční pájení probíhá tak, že pájecí hrot působením tepla začne prostupovat do povrchu mědi a za přiložení pájecí slitiny vznikne požadovaný spoj. Samozřejmě kvalitní spoj vznikne tehdy, jestliže je měděný povrch bez kontaminace a bez oxidů. Při ručním pájení je důležité především zajistit kvalitní přenos tepla na rozhraní dvou pracovních teplot. Celý proces spojení by měl trvat několik vteřin, většinou zhruba 4-10s. [23], [24]

Čím vyšší je teplo, tím nižší je životnost hrotu. Vyšší teploty zkracují životnost především z těchto důvodů: [22], [24]

- Vyšší teploty mají za důsledek zvyšování oxidace a velmi ovlivňují chemickou korozi hrotů
- Teplejší tavidla jsou chemicky aktivnější
- Jak je známo, vyšší teploty nám způsobují větší deformaci kovů. V tomto případě nám to způsobuje, že vnější pokovení kompozitních hrotů nám popraská daleko dříve, než by tomu bylo při nižších teplotách

- Teplejší kovy rychleji podléhají deformaci

U ručního pájení může nastat mnoha chyb, především ze strany obsluhy. Důležitým prvkem je kvalitně prohrátý pájený spoj tak, aby se pájecí slitina efektivně rozlila okolo vývodu. Vývody by měli mít velikost maximálně 3mm. [22], [24]



Obrázek 14: Správně a nesprávně rozlitý pájený spoj, vlevo správně, vpravo nesprávně převzato z [24]

3.1.1 Transformační páječka

Mezi nejčastější ruční páječky patří transformátorová pájka. Základem je primární vinutí, které je spojeno přes spínač na přívodní vodič. Na sekundárním vinutí je velmi malé napětí, ale velký proud, což ve výsledku dosahuje příkonu několik desítek Wattů. Tím pádem po stisku spínače probíhá zahřívání pájecího hrotu. Teplota pak může dosahovat až stovek °C. [25]

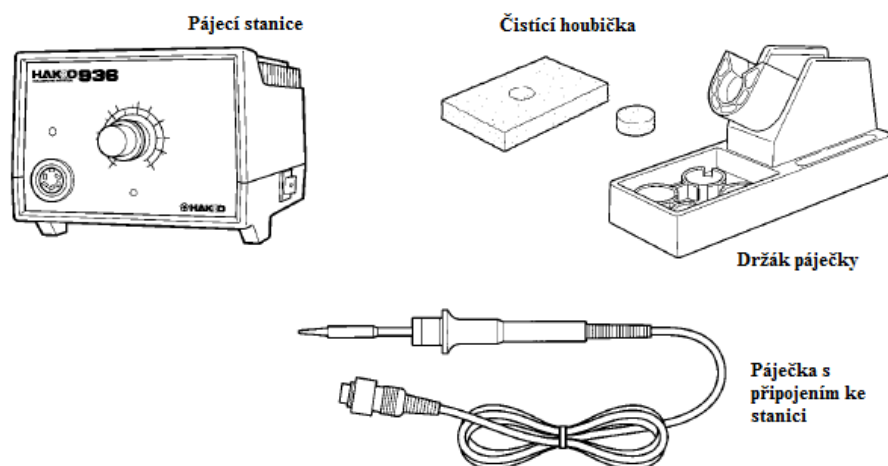


Obrázek 15: Transformační páječka, převzato z [25]

3.1.2 Pájecí stanice

Pájecí stanice jsou sestavy z více částí. Základem je pájecí stanice, která slouží především k regulaci teploty. Dalším podstatným prvkem je odkládací držák na páječku, včetně čistící houbičky, která slouží k očištění od zbytků pájecí slitiny. Posledním prvkem je samotná ruční páječka. [26], [27], [28]

Nevýhodou pájecích stanice je menší výkon oproti klasické transformátorové páječce. Zde se výkon pohybuje v rozmezí okolo 50W. Další nevýhodou může být vysoká cena. Naopak obrovskou výhodou může být právě regulace teploty. Po nastavení teploty dokáže pájecí stanice udržovat pájecí hrot v konstantním stavu. [27], [28]



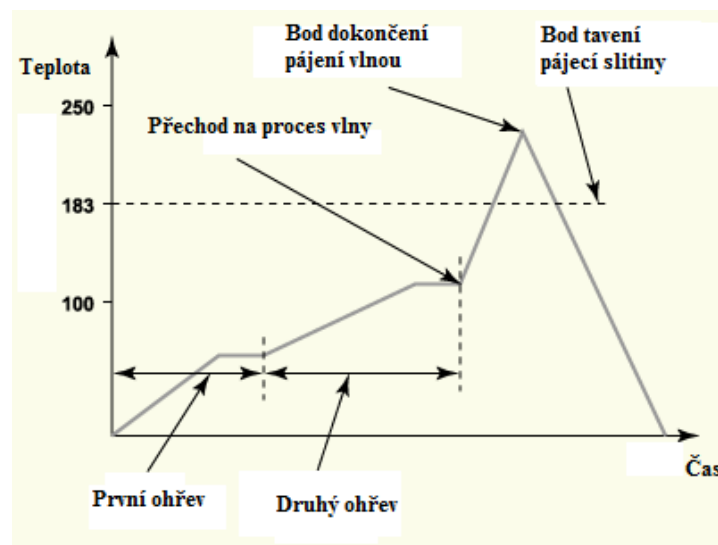
Obrázek 16: Sestava pájecí stanice

3.2 Strojní pájení vlnou

Strojní pájení vlnou je jedna z historicky prvních strojních metod, které se začala používat, aby usnadnila celý proces (nejen kvalitou, rychlostí, ale i cenou) především s komplikovanými osazenými DPS. Celý proces spočívá v přechodu osazené DPS, přes trysku, která nanáší roztavenou pájecí slitinu. Tryska je prakticky orientována kolmo na desku plošného spoje s tím, že šířka je dána většinou velikostí dopravníku. Tímto způsobem může být deska zapájena prakticky během několika vteřin. Pájení vlnou je v tzv. „in-line“ provedení. Což znamená, že má za sebou určité kroky z celého procesu. Do takového procesu patří nanášení tavidla, systém předehřátí, pájecí vlna a na posledním místě se nachází systém, který slouží k ochlazení výsledného produktu. [29], [30], [31]

- **Nanášení tavidla**
 - Nanesení tavidla na celou spodní stranu DPS
 - Nevýhodou je velká spotřeba
 - Ve většině případů nanášení pomocí rozprašovače při průchodu DPS
- **Předehřev**

- Aktivace tavidla
- IR zářiče / Horkovzdušné moduly
- **Proces vlny**
 - Zapájení součástek
 - Možný vznik pájecích můstků
 - V lepších zařízeních jako přídatný komponent HAK (proudem horkého vzduchu sfoukává přebytek pájecí slitiny zpět)
- **Chlazení**
 - Zchlazení až na 3°C
 - Připraveno pro další kontrolu
 - Ofukování DPS studeným vzduchem



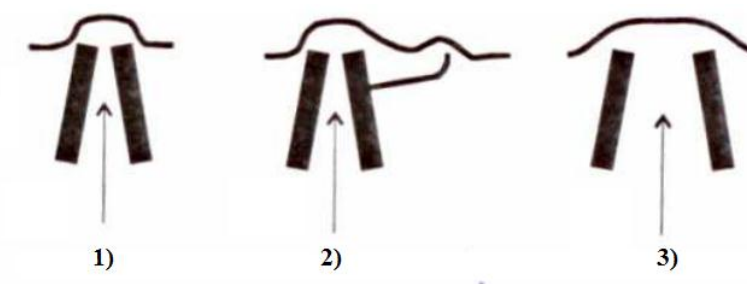
Obrázek 17: Proces strojního pájení vlnou, převzato z [30]

3.2.1 Konstrukce vlny

Co se týče konstrukce vlny, největší problém se musel řešit v oblasti pájení SMD a integrovaných součástek. Na tyto „miniaturní“ součástky klasická jednoduchá vlna nestačí a je nutné jí kombinovat s jinými druhy vln. Tím pádem si můžeme typy vln rozdělit do dvou skupin: [32], [33], [34]

- **Skupina A:**

Do skupiny A spadají tzv. oboustranné vlny. Pájecí slitina je tlačena za pomoci čerpadla do trysky, díky čemuž pak přetéká a tvoří požadovaný tvar. Na obrázku č. 18 jsou zobrazeny tři typy vlny skupiny A. Typ 1 a 3 je jednoduchá vlna, která převažuje ve většině pájecích stanic. Typ 2 je pokus o vytvoření dvojité vlny za pomoci trysky. Snížená druhá vlna zajišťuje negaci problému s krápníky. [32], [33], [34]



Obrázek 18: Vlny spadající do skupiny A, převzato z [33]

- **Skupina B:**

Do skupiny B se zařazují tzv. reflexní vlny. Jedná se především o vlny, které jdou proti směru dopravníku s DPS a díky tomu tyto vlny snižují pravděpodobnost vzniku krápníků. Na obrázku č. 19 jsou vlny seřazeny v pořadí: delta vlna, dutá vlna a poslední je na obrázku zobrazena turbulentní vlna. [32], [33], [34]



Obrázek 19: Vlny spadající do skupiny B, převzato z [33]

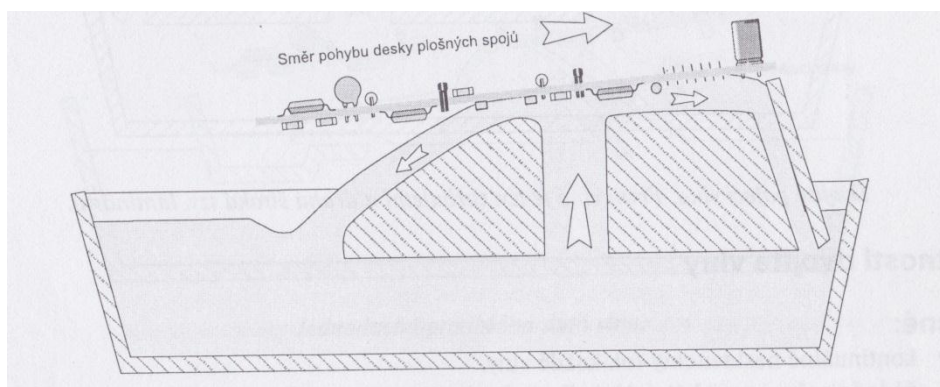
Pájecí zařízení se skládá z následujících součástí:

- Vyhřívaná nádrž na pájecí slitinu
- Mechanické nebo elektrodynamické čerpadlo
- Vedení proudu pájecí slitiny
- Trysky, které udávají tvar vlny

Nádrž s pájecí slitinou je důležité udržovat při konstantní teplotě. Stroje na vlny se vyrábí v různých velikostech, od zhruba 20 cm – 50 cm. Množství pájecí slitiny uvnitř zařízení je pak dáno konstrukcí a velikostí celého zařízení. U nejmenšího zařízení je množství slitiny okolo cca 30 kg, u těch větších se pak dosahuje množství až 250 kg. V praxi se ustálily tři základní typy vln – Jednoduchá vlna, dvojitá vlna a dutá vlna. [32], [33], [34]

3.2.2 Jednoduchá vlna

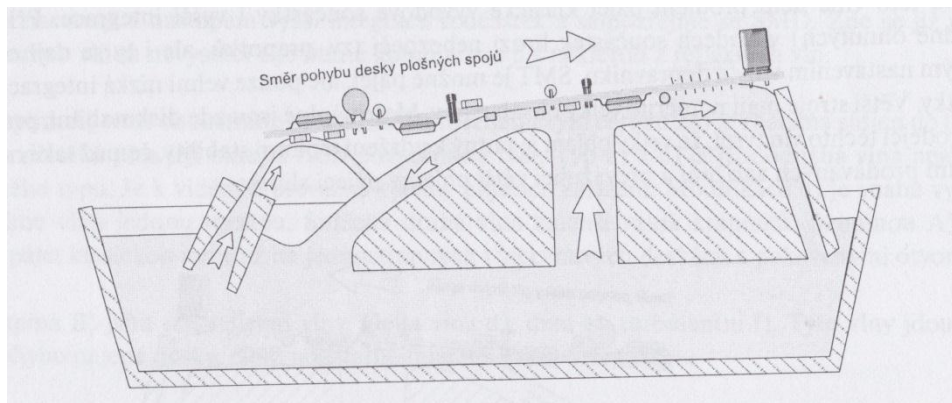
Nejjednodušší pájecí vlna. Ve většině případů slouží pro zapájení klasických vývodových součástek. Pozor je třeba dát na délku vývodů, jelikož v případě delších vývodů mohou vzniknout tzv. „praporky“. [35], [36]



Obrázek 20: Jednoduchá vlna, převzato z [4]

3.2.3 Dvojitá vlna

Obsahuje dvě vlny. První vlna má za úkol smáčet veškeré součástky na spodní straně DPS. Důležité je nastavit výšku vlny z důvodu možného přetečení na horní stranu. Dvojitá vlna se používá často kvůli eliminaci všech nedostatků, hlavně při pájení SMD součástek. Nevýhodou je ovšem množství pájecí slitiny, která je třeba k použití (většinou okolo 200-600kg). Další nevýhodou určitě je tepelné namáhání součástek, jelikož DPS musí projít přes dvě vlny. Výhodou je, že nehrozí vyskytnutí tzv. „stínů“ za součástkami. Důležité je především zabránit tomu, aby jedna vlna ovlivňovala druhou. Zásadní podmínkou je, aby přístroj vypnul celý proces, jakmile roztavená pájecí slitina klesne, nebo překročí požadovaný teplotní rozsah. Ve většině případů bývá dolní mez okolo 220°C a horní mez 280°C. [35], [36]



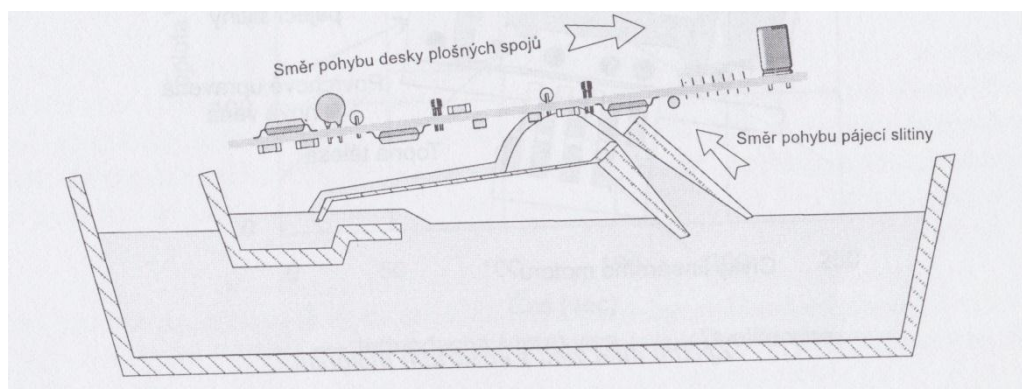
Obrázek 21: Dvojitá vlna, převzato z[4]

Obecné vlastnosti dvojitě pájecí vlny:

- První vlna musí být vždy turbulentní
- Pájecí vana musí mít takovou konstrukci, aby byla jednoduše čistitelná, což znamená, že nesmí mít nějaké nepřístupná místa
- Vlny se nesmějí navzájem ovlivňovat
- Pěna, která vzniká mezi vlnami, musí volný výstup tak, aby nedocházelo k zanesení
- Pájecí nádoba má svou danou velikost, ovšem musí být nastavitelná
- Pokud dojde k zastavení dopravníku, musí okamžitě dojít k zastavení celé činnosti zařízení
- Pájecí lázeň musí mít teplotu cca 250 °C, čas pro přehřátí se pohybuje okolo 2 hodin
- Teplotní odchylka v rámci celé šíře vlny musí být co nejmenší
- Pájecí lázeň je zhotovena z tepelných článků, pokud by se jediný článek zhoršil, ostatní články musí udržet teplotu, která je požadována

3.2.4 Dutá vlna

Poslední varianta se nazývá dutá vlna. Využívá se zejména v Japonsku. Základem je elektromagnetický motor, díky němuž není potřeba tolik roztavené pájecí slitiny, jako například u dvojitě vlny. Tento motor prakticky vytváří vlnu, která se pohybuje v celém objemu, z čehož vyplývá, že systém nemá žádnou pohyblivou složku. Pomocí duté vlny se dají zapájet jakékoliv typy součástek. [37]



Obrázek 22: Dutá vlna, převzato z [4]

3.3 Pájení přetavením

Strojní pájení přetavením je další významná metoda pájení. Základní princip spočívá v přesném opaku, než je tomu u pájení vlnou, nebo už výše zmíněném ručním pájení. Princip pájení přetavení spočívá v tom, že se pájecí materiál nanese na místo, které chceme pájet a poté dojde k působení tepelné energie = přetavení pájecího materiálu. Hlavní rozdíl je v tom, že místo pájecí slitiny jsou nejčastěji používány pájecí pasty. Aby byl zajištěn kvalitní přenos, je důležité po celou dobu procesu zajistit trvalý přísun tepla. [38], [39]

3.3.1 Nanášení pájecí pasty

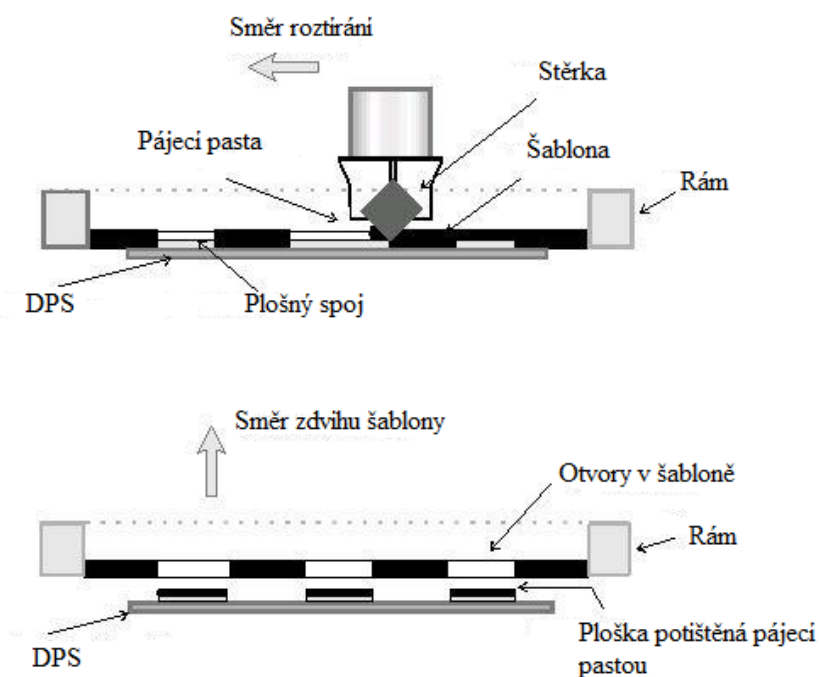
Pájecí pasta se může nanášet třemi možnými způsoby. Mezi nejrozšířenější metody patří například sítotisk, nebo šablonový tisk. [40], [41]

a) Sítotisk

Pod pojmem „sít“ je důležité si představit síťku z vláken (nylon, polyester, ...), která je opatřena fotocitlivým materiálem. Co se pak hustoty ok týče, ta by se měla pohybovat okolo 25-78 oky/1 cm. V porovnání s jednou částicí pájecí pasty by jedno oko mělo být zhruba až 4 větší (v praxi je zhruba velikost částice okolo 50 μm , což pak znamená, že síťka je veliká okolo 200 μm). Na místa, kde má být nanášena pájecí pasta je nasvíceno UV světlo, který je jedním z kroků v celém procesu. Díky UV ozáření je materiál odstraněn a následně je neosvětlená vrstva vytvrzena. Síť by mělo být umístěno 0,8-1 mm nad DPS a vyrábí se buď v obdélníkovém, nebo čtvercovém tvaru. Je umístěna v rámu, se kterým by měla svírat úhel 45°. Síť je prohýbána díky třece, která protlačuje pájecí pastu na vodivá místa, která jsou dána motivem síta. Ihned po protlačení se síť nadzvedává zpátky a pájecí pasta zůstává pouze na místech, kde jsou pájená místa. [40], [41]

b) Šablonový tisk

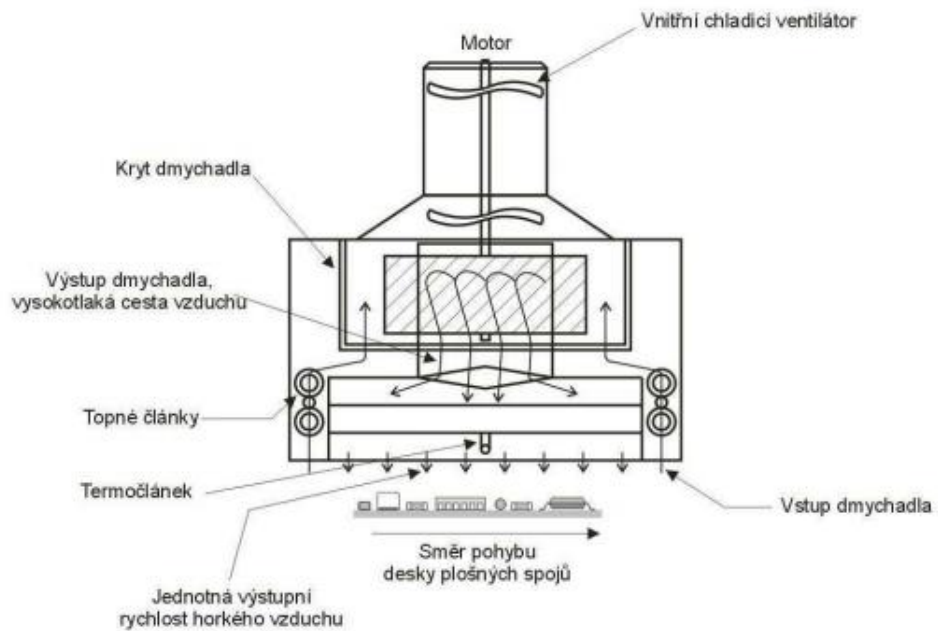
U této metody opět dochází k protlačování pájecí pasty na DPS za pomoci stěrky, akorát s tím rozdílem, že pasta je protlačována přes kovovou šablonu, na které je znázorněn motiv, jenž má být následně na desce plošného spoje. Díky materiálům je tu ještě jeden značný rozdíl, oproti tisku přes síto, a to ten, že šablony se vyrábějí většinou z nerezové oceli, mosazi, a dalších podobných kovů, což znamená, že nedochází k prohýbání a celá šablona zůstává plně natlačena na desce plošného spoje. Stěrka je zhotovena z pevné pryže, nebo dokonce i z kovu. [40], [41]



Obrázek 23: Princip šablonového tisku, převzato z [40]

3.4 Konvekční pájení

Princip je velice jednoduchý. Spočívá v proudění horkého stlačeného vzduchu do místa, které je opatřeno pájecí pastou tak dlouho, až dojde k zahřátí a přetavení. Aby se zabránilo oxidaci, používá se jako ochrana dusík. Teplota na výstupu se může pohybovat v rozmezí od 350°C do 400°C. Metoda pomocí horkého vzduchu je vhodná při opravách DPS. Samozřejmě i zde platí, že pájení zabere určitý čas, záleží však, jestli součástky jsou chladné, nebo byly před použitím horkého vzduchu předeřhřáty. Velká výhoda této metody je přímý kontakt horkého vzduchu se součástkou. [42]



Obrázek 24: Princip pájení za pomoci horkého vzduchu; převzato z [42]

3.5 Kondenzační pájení

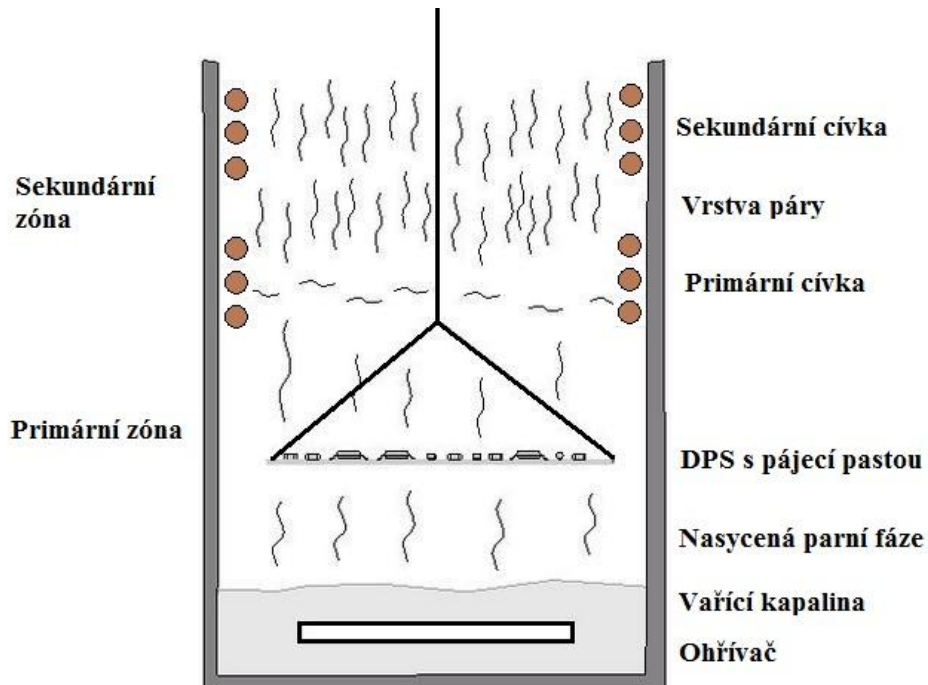
Princip této metody spočívá v zahřívání kapaliny, která se následně začne odpařovat (tzv. „kondenzace“). DPS se součástkami se vloží právě do této zóny, kde se odpařuje kapalina, díky tomu pára začne kondenzovat na chladných plochách vložené DPS. Kondenzace, která probíhá za předpokladu, že teplota je daleko vyšší, než je teplota tavení pájecí slitiny způsobuje, že teplo páry zahřívá a začne působit na DPS a tím i pájené spoje = pájený spoj. [43], [44], [45]

Výhody:

- Jedná se o proces tzv. hromadného pájení
- Ohřev kapaliny je rychlý (± 15 minut)
- Rovnoměrné rozložení tepla
- Je možno pájet součástky jakékoliv hmotnosti
- Není možné překročit maximální hodnotu teploty
- Nedochozí k oxidaci, díky absenci kyslíku

Nevýhody:

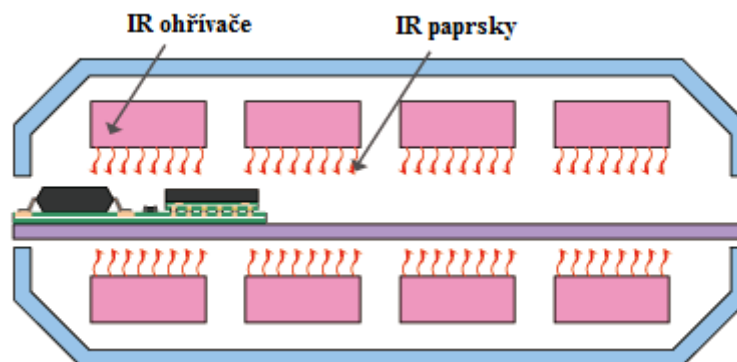
- Omezené množství pájecích teplot
- Vysoká cena kapaliny
- Během procesu dochází ke ztrátám kapaliny



Obrázek 25: Princip pájení v horkých parách [45]

3.6 Pájení infračerveným zářením

Tato metoda souvisí s vyzařováním tepla pomocí IR zářičů. IR paprsky musejí dopadat kolmo na DPS, která po pásu projíždí pájecí soustavou. Na konci je opět ochlazována. Samozřejmě i zde může nastat problém, a to především ze strany záření. Je třeba si uvědomit, že záření s vlnovou délkou mají na sebe vliv. Může se tedy stát, že bude teplo nerovnoměrně rozloženo (například, že tmavší součástky budou ohřívány více, nežli pájecí pasta). [44], [46]

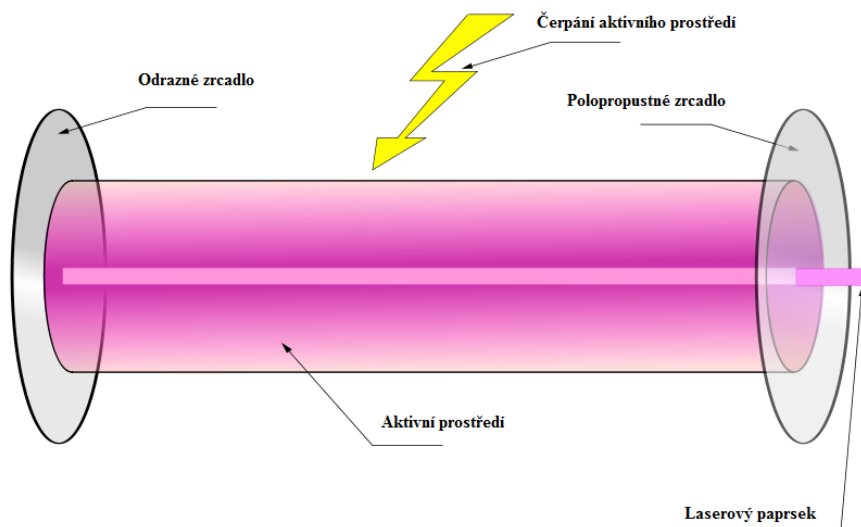


Obrázek 26: Princip pájení IR zářením, převzato z [46]

3.7 Pájení laserem

U této metody platí především přednosti laseru. Laser je obecně zdroj optického záření, který je vytvořen ze tří částí. Tou první je aktivní část, rezonátor a třetí částí je zdroj energie. [47], [48]

Výhoda laserového pájení je ta, že zahřívá spoj jen ve velmi úzké stopě, tudíž dokáže daný spoj zahřát na požadovanou teplotu během chvíle. Dříve byly používány YAG lasery, ale v dnešní době je zcela začínají nahrazovat lasery na bázi výkonových diod. Vcelku jsou diodové lasery lepší ve výrobě, nežli lasery YAG už jen z důvodu kruhového paprsku, díky kterému umožňují diodové lasery určitý přehřev ještě před nanášením pasty. Další výhodou může být životnost, která se u diodových pohybuje okolo 10000 h oproti 500-1000 h. [47], [48]



Obrázek 27: Princip laseru, převzato z [48]

3.8 Kontrola a testování osazení DPS

Mezi nezákladnější kontroly patří optické a elektrické testování osazených DPS. [49]

- **Optická kontrola** – Optická kontrola se rozděluje na tři části. Tou první částí je lidský zrak. Říká se, že tato metoda je nejlevnější a nejjednodušší. Samozřejmě operátor musí mít dostatečné zkušenosti a i v jeho případě je zrak ten nejdůležitější faktor. Druhá část je velice podobná té první, ale s tím rozdílem, že se používá dílenská lupa, nebo mikroskop. Slouží ke kontrole osazených desek s větší hustotou součástek. Třetí část je zařízení, které podle zadaných

hodnot dokáže určit závadu (tzv. „Automatické optické inspekční testovací systémy“)

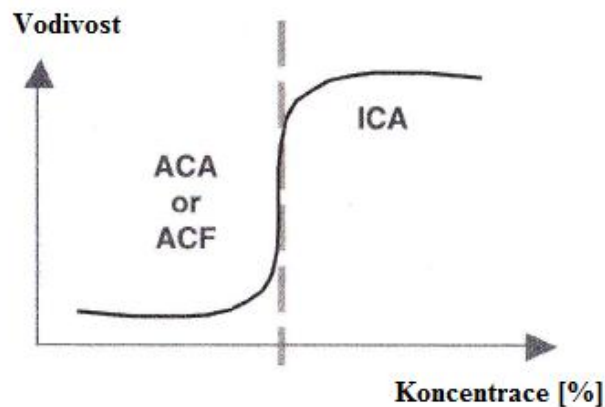
- **Elektrické testování** – Kontrolní elektrické testy se dělí na dva základní typy. Tím prvním je funkční test, který může být ve výsledku jedním s hlavních testů osazené desky. Kontrolovaná deska je připojení konektory (ty jsou samozřejmě na desce umístěné) připojeny k testovacímu zařízení. Následně za pomoci vysílaných signálu na desku, která je pod napětím můžeme sledovat, kde je možnost výskytu vady, či chyby. Samozřejmě tato kontrola může být zdlouhavá. Druhým typem je vnitroobvodový test (In-Circuit, MDA, ...). Tento test spočívá v tom, že měřicí jehla kontrola každý uzel zapojení, který se nachází v zapojení na DPS. Bohužel tento test neslouží ke kontrole celé funkce zařízení, nýbrž ke kontrole základních závad. I přesto je tato kontrola důležitá, jelikož tyto triviální vady daleko převyšují vady ve funkci zařízení

4 Elektricky vodivá lepidla

ECA, jak se zkráceně vodivá lepidla označují, hrají stále významnější roli v oblasti vodivého propojování součástek. Jejich technologické zlepšení umožňuje postupné nahrazování pájení. Jak je známo, podle směrnice RoHS je od 1. července 2006 pozastaveno používání olovnatých pájek a právě elektricky vodivá lepidla mají být technologická náhrada olovnatého pájení obecně. [50], [51]

Elektricky vodivá lepidla mají dvě základní složky. Tou první jsou izolační matrice (pojivo), druhou částí jsou vodivé částice (plnivo). Izolační matrice je ve většině případů tvořena z pryskyřice. Nejčastěji se jedná o epoxidovou, silikonovou, nebo polyamidovou. Epoxidová pryskyřice je ze všech asi nejvhodnějším typem, jelikož zajišťuje díky své houževnatosti dobrou odolnost proti korozi a zvyšuje celkovou spolehlivost zařízení. Vodivé částice jsou tvořeny z částic dražších kovů. Mohou to být částice stříbra, zlata, niklu a dalších. Obecně se může říct, že lepidla, která mají vodivé částice z částic zlata, mají nejlepší vodivé a tepelné vlastnosti. Každopádně jejich cena se odráží na materiálu, ze kterých jsou vodivé částice sestaveny. [50], [51]

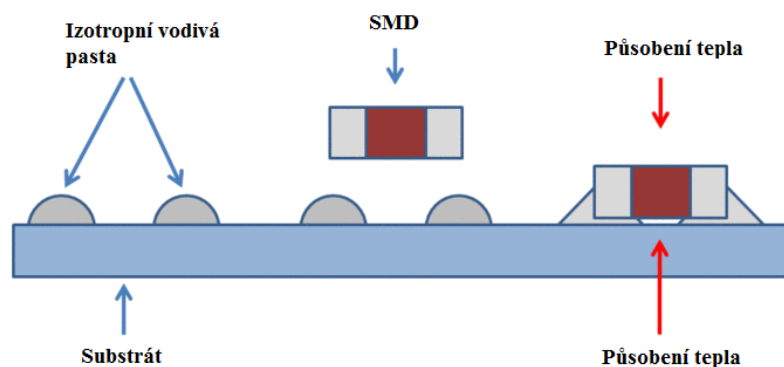
Na vytvrzení se používá speciální horkovzdušná sušárna, pec, kde působí IR záření jako „vyzařovač“ tepla. Konkrétně se sušárny dělají zhruba do 250°C. U některých lepidel je možné nechat tvrdnout při pokojové teplotě, ovšem z hlediska časové doby se to moc nevyplatí. Každopádně ze všech hledisek vodivá lepidla ještě nejsou schopna plnohodnotně nahradit pájecí procesy. Ovšem jsou i technologie, kde by se bez vodivých lepidel obejít nedalo, a to konkrétně u technologie LCD. Výhodou je, že vytvrzený spoj může mít větší pružnost (samozřejmě při použití kvalitního pojiva), než spoj spájený. Slouží to především ve větší odolnosti vůči tepelným změnám během pracovního procesu, jelikož už při výrobě jsou lépe vyrovnány tepelné roztažnosti materiálů. [52]



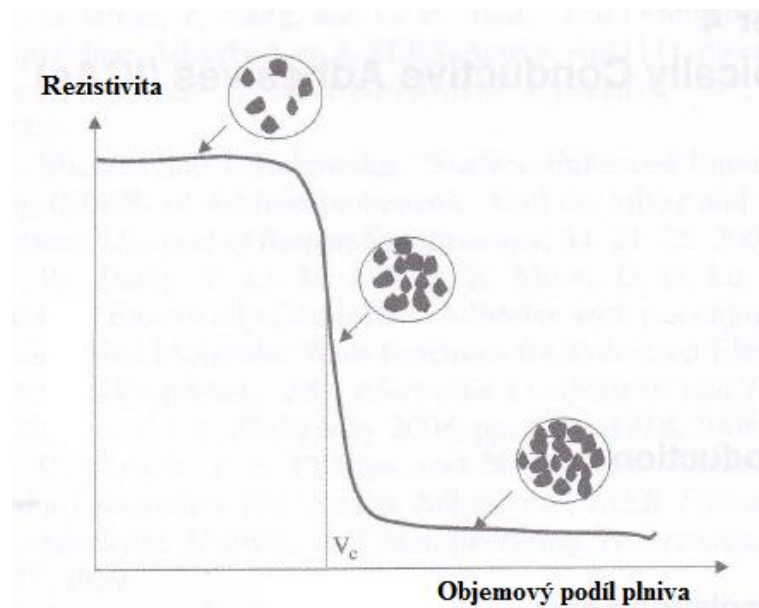
Obrázek 28: Závislost vodivosti na koncentraci částic v izolační matrici, převzato z [54]

4.1 Izotropní lepidla

Izotropní lepidla se vyznačují především tím, že mají ve všech směrech stejnou vodivost. Jsou složeny z polymerové pryskyřice a vodivých plniv. Udává se, že vodivá složka bývá u izotropních lepidel zhruba okolo 28%. Vodivostní složku ve většině případů tvoří částice ve tvaru kuliček, které mají stejnou velikost. Samozřejmě to není podmínka, protože vodivou složku může tvořit i směs částic ve tvaru lupínků a kuliček. Základní vazební složku v tomto případě tvoří epoxidová pryskyřice. Izotropní lepidla se používají především pro propojení jednoduchých součástek, jako jsou rezistory, či vývody čipů. Podle schématického znázornění (obr. č. 53) lze zpozorovat, že vodivost značně klesá po překročení V_C , což je v tomto případě tzv. práh perkolace. [53], [54]



Obrázek 29: Nanášení izotropních lepidel [52]



Obrázek 30: Objemový podíl plniva v závislosti na rezistivitě, převzato z [54]

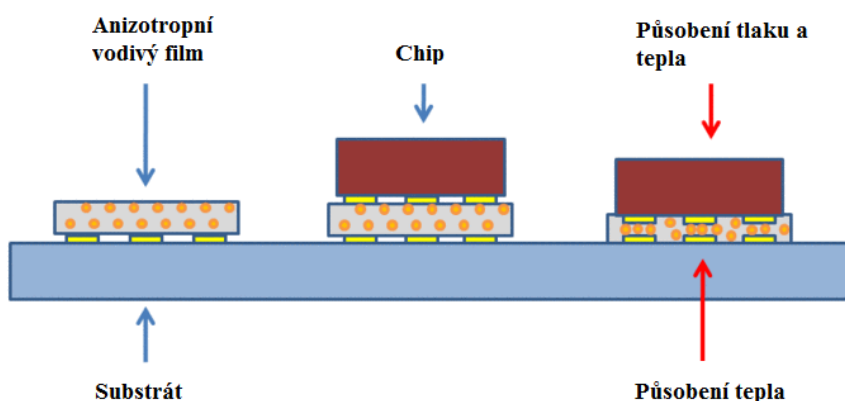
4.2 Anizotropní lepidla

Anizotropní lepidla jsou obecně složena z matrice na bázi polymeru s vodivým plnivem. Vodivými plnivy mohou být jakékoliv vodivé částice, nebo polymerní pokovené kuličky. Na rozdíl od izotropních lepidel se anizotropní lepidla vyznačují tím, že nemají stejnou vodivost ve všech směrech, ale jen pouze v jednom směru a to ve směru, který je kolmý na desku plošného spoje. Velikost jedné kuličky pak bývá okolo 10 μ m. Částice jsou z tvrdého polymeru a ve většině případů mívají na povrchu nanesenou vrstvu, která je vodivá (většinou to bývá nějaký z kovů, například Ag). Anizotropní lepidla se dodávají ve dvou formách, buď ve formě pasty (ACP), nebo ve formě filmu (ACF). [53], [54]

4.2.1 Technologie ACF

Za pomoci technologie ACF se nejčastěji využívá připojení součástek COB. Nejlépe si tento příklad můžeme představit u připojení ovladačů na LCD panely. Oproti jiným variantám je výhodou technologie ACF v tom, že lze jednoduše opravit, či přímo předělat. Pracovní postup při připojování technologií ACF pak bude následující: [53]

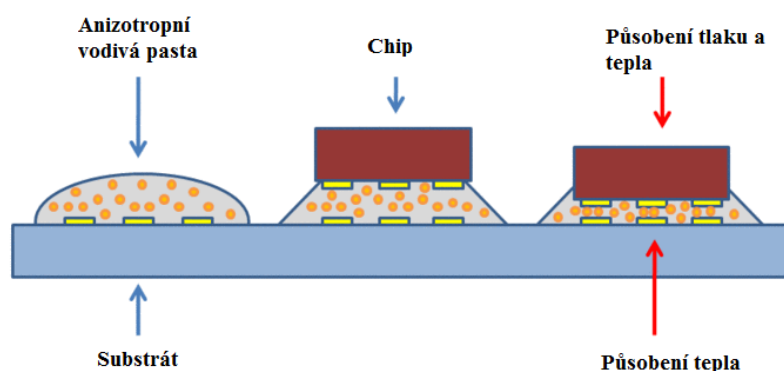
- Připojení anizotropních vodivých filmů k substrátu
- Substrát a čip dostat do roviny
- Osazení čipu
- Za pomoci síly (tlaku) a teploty zajistit konečné připojení



Obrázek 31: Připojení čipů za pomoci technologie ACF [53]

4.2.2 Technologie ACP

Tato technologie se nejčastěji používá v aplikaci RFID. Vodivé částice jsou natlačeny mezi vývody a během krátkého časového intervalu jsou za pomoci vyhřívacího nástroje vytvrzeny. [53]



Obrázek 32: Připojení čipů za pomoci technologie ACP[53]

4.3 Zásady pro aplikaci lepidel

Vodivá lepidla mají své podmínky nejenom v uskladnění, ale také i používání. Nedodržení základních podmínek může vést k nekvalitnímu lepenému spoji.

- Důležité je uskladňovat lepidla ve speciálních nádobách a v chladných prostředích. Díky chladnému okolí totiž lepidlo získává delší životnost
- Plochy, na které je nanášeno vodivé lepidlo je důležité pečlivě očistit, aby lepidlo mohlo mít co nejlepší podmínky pro kvalitní vodivost

- Důležité je nanést vhodnou vrstvu lepidla. Pokud by bylo naneseno větší množství, došlo by k přetékání. Naopak při nedostatku lepidla by mohlo docházet k odpadávání součástek a celkově jejich vlastnosti by byly horší
- Při použití dvousložkových lepidel je nutné dávat pozor na správné namíchání ještě před aplikací. Požadovaný poměr by měl být uveden výrobcem. Obecně se dvousložková lepidla moc nevyužívají z důvodu, že představují další pracovní postup navíc

Tabulka 3: Srovnání vodivých lepidel, převzato z [55]

Vazební složka (Pryskyřice)	Vodivostní složka (Plnivo)	Typ částic	Objemový odpor (Ω/cm)	Doba vytvrzování (min)	Teplota vytvrzování ($^{\circ}\text{C}$)
Epoxidová	Ag	Lupínky	$6 \cdot 10^{-5}$	60	130
Epoxidová	Sn/Cu	Lupínky	$4,5 \cdot 10^{-3}$	30	125
Epoxidová	Ni	Lupínky	1	120	65
Polyimidová	Ag	Jiný	$5 \cdot 10^{-4}$	60	140
Silikonová	Ag	Lupínky/Kuličky	$1 \cdot 10^{-2}$	10080	25

5 Porovnání pájení a vodivého lepení

Dle tabulky č. 4 lze pozorovat, že obecně pájení má oproti vodivému lepení lepší elektrické a mechanické parametry. Zatímco vodivá lepidla mají poměrně vyšší cenu, naproti tomu pájky se vyznačují lepší spolehlivostí a dalšími poměrně důležitými vlastnostmi. Každopádně do budoucna je třeba počítat s tím, že lepidla se budou dále zdokonalovat a jednou třeba i nahradí pájení. Odpor pájených a lepených spojů je srovnatelný, zatímco šum a nelinearita je vyšší na straně lepidel. [56]

Tabulka 4: Srovnávací tabulka, převzato z [56]

Vlastnosti	Pájky	ECA
Vodivost	Izotropní	Izotropní/Anizotropní
Odpor	Srovnatelný	Srovnatelný
Šum	Nižší	Vyšší
Nelinearita	Nižší	Vyšší
Stabilita	Vyšší	Nižší
Odolnost proti navlhnutí	Vyšší	Nižší
Adheze	Vyšší	Nižší
Spolehlivost	Vyšší	Nižší
Doba života	Vyšší	Nižší
Cena	Nižší	Vyšší

Závěr

Pájení a vodivé lepení patří mezi nepostradatelné metody propojování dvou kovů (součástek) v elektrotechnice. Jedná se o proces, který je ve výsledném produktu jeden z nejdůležitějších a zajišťuje výslednou funkci. Pro spojení dvou kovů využíváme pájecí slitiny, nebo lepidla, která musí mít určité parametry pro správné a funkční použití. Nejčastějším kovem, který se používá pro pájecí kontakty, je měď.

Práce zahrnuje popis veškerých podmínek pro vznik kvalitního pájeného spoje, včetně parametrů. Důležitou podmínkou pro vznik pájeného spoje je také výběr tavidla, či pájecí slitiny. Mezi nejpoužívanější bezolovnaté pájecí slitiny patří slitina 96,5%Sn/3%Ag/0,5%Cu. Při pájecím procesu mohou také nastat určité problémy, jako je například oxidace, či kontaminace. Mezi další parametry jsou zařazeny také mechanické, elektrické a tepelné požadavky, jakost pájeného spoje, dále také životnost a stárnutí a důležitým faktorem je také tzv. „stykový“ úhel, který je důležitý především při kontaktu mezi pájecí slitinou a pájenou plochou. V poslední řadě se pájený spoj může podrobit zkouškám, mezi které patří ponořovací test, kuličkový test, dále také roztékavost pájecí slitiny, nebo metoda smáčekých vah.

Mezi nejzákladnější metody pájení patří ruční pájení, do kterého si můžeme zařadit vysokofrekvenční pájení, pájení proudem horkého vzduchu, nebo klasické transformátorové páječky. Další důležité metody patří již do kategorie strojních. V první řadě se jedná o pájení vlnou, pájení vlnou se dělí na jednoduchou, dvojitou a dutou vlnu. U pájení vlnou je důležitá ochrana pájecí slitiny, která může být provedena buď olejem, nebo plynem (nejčastěji dusíkem). Poslední základní metodou je pájení přetavením, které je možné rozdělit na několik typů. Mezi možné metody pájením přetavením spadá pájení v parách, pájení infračerveným zářením, nebo pájením laserem. U pájení přetavením jsou důležitými podmínkami velikost zrn a správný typ pájecí pasty.

Dále jsou v práci shrnuta elektricky vodivá lepidla, konkrétně izotropní a anizotropní. Důležitým faktorem lepidla je, že se skládá ze dvou složek (vazební a vodivá). Anizotropní lepidla pak lze rozdělit na dvě důležité technologie a to technologii ACF a ACP.

Ze všech informací v této bakalářské práci je evidentní, že pájení si drží stálou „nadvládu“ ve srovnání s vodivými lepidly. Pájení má oproti lepidlům pořád obrovské

přednosti, ale na druhé straně vodivá lepidla mají určitou budoucnost, pokud se na jejich zdokonalování bude stále pracovat.

Použitá literatura

- [1] Historie svařování v českých zemích: Úvod do historie svařování. DVOŘÁK, Karel. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. 2008 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=239>
- [2] Kukátko do historie svařování. GRUBER, Josef. *Osobní stránky* [online]. 2012 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/benardos.pdf
- [3] ŠTECH, Karel. Co je pájení. *Chatař a chalupář*. 2005, (2), 2.
- [4] ABEL, Martin a Vladimír CIMBUREK. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Vyd. 1. Pardubice: ABE.TEC, 2005, 179 s. ISBN 80-903597-0-1.
- [5] *Měření pájitelnosti metodou smáčecích vah při tenzi par*. Praha, 2015. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61182/F3-BP-2015-Husak-Jiri-BP%20Jiri%20Husak-Pajitelnost%20odevzdana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Karel Dušek, PhD.
- [6] LABAJ, Radek. *Vliv smáčecích charakteristik na spolehlivost pájeného spoje*. Brno, 2010. Dostupné také z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28808.
Diplomová práce.
- [7] STARÝ, Jiří; KAHLE, Petr; ŠANDERA, Josef. *Plošné spoje a povrchová montáž*. PC-DIR Real, 1999.
- [8] RŮŽIČKA, Daniel. *Studium vlivu množství tavidla na výskyt voidů v pájeném spoji* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/23362/F3-DP-2014-Ruzicka-Daniel-prace.pdf?sequence=3>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Karel Dušek, Ph.D.
- [9] *Testování aktivity tavidel pomocí testu roztékavosti* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/15294/BP_dominik_harman.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Karel Rendl.

- [10] *Testování pájitelnosti pomocí Concoat MUST SYSTEM II* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/4751/Novotny_Jan_Testovani_pajitelnosti_pomoci_Concoat_MUST_SYSTEM_II.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Tomáš Novák.
- [11] *Pevnost pájených spojů na keramických substrátech: The strength of soldered joints of ceramic substrates*. Brno, 2013. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69279. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Adámek, Ph.D.
- [12] *Studium difúze med'natých iontů v huminovém gelu metodou difuzních cel*. Brno, 2010. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26878. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Martina Klučáková Ph.D.
- [14] *Koroze a ochrana před korozí* [online]. Pelhřimov, 2005 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/Koroze.htm>
- [15] *Měření pájitelnosti metodou smáčecích vah při tenzi par* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61182/F3-BP-2015-Husak-Jiri-BP%20Jiri%20Husak-Pajitelnost%20odevzdana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Karel Dušek, Ph.D.
- [16] *Využití pájení v parách pro testování pájitelnosti* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/4034/Bakalarska%20prace.pdf?sequence=1>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Tomáš Novák.
- [17] *Diagnostika propojovacích struktur* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/4713/Diagnostika_propojovacich_struktur_\(BP\)_NETRH.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/4713/Diagnostika_propojovacich_struktur_(BP)_NETRH.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Václav Wirth.
- [18] What is Oxidation? - Definition, Process & Examples. *Study.com* [online]. Mountain View, 2016 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://study.com/academy/lesson/what-is-oxidation-definition-process-examples.html>
- [19] *Tavidla pro bezolovnaté pájení a jejich vliv na spolehlivost* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/12397/Michal%20Grametbauer.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Doc. Ing. František Steiner Ph.D.

- [20] Understanding 'tombstoning' and how to prevent it. *Manufacturing / Production Technology, Hardware & Services* [online]. 2003 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://www.dataweek.co.za/news.aspx?pklnnewsid=11343>
- [21] Tombstoning. In: *Martin Tarr (Associates)* [online]. Dunfermline, Scotland [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://www.mtarr.co.uk/courses/topics/0168_tomb/index.html
- [22] *Optimalizace procesu pájení ve výrobě přístrojových transformátorů*. Brno, 2014. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=83803. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [23] Soldering Basics. *Circuit Technology Center* [online]. Haverhill, 2011 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://www.circuitrework.com/guides/7-1-1.shtml>
- [24] *Pájecí slitiny v elektrotechnice* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/18858/Bakalarska%20prace%20Zrubecky%20\(elektronicka%20verze%20se%20zadanim\).pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/18858/Bakalarska%20prace%20Zrubecky%20(elektronicka%20verze%20se%20zadanim).pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Martin Hirman.
- [25] Transformátorová páječka - jak pájet? *Radioklub OKIKPI* [online]. Písek, 2008 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://www.kufr.cz/view.php?cisloclanku=2012100003>
- [26] *Regulace pece pro pájení SMD* [online]. Pardubice, 2013 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/53569/NosilL_RegulacePece_PR_2013.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Pavel Rozsival.
- [27] How to Pick the Best Soldering Iron. *Instructables* [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/How-to-Pick-the-Best-Soldering-Iron/?ALLSTEPS>
- [28] Něco o pájení - část 1. In: *RC.305* [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://rc.305.cz/view.php?cisloclanku=2010030001>
- [29] Wave soldering. *Radio-electronics.com* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www.radio-electronics.com/info/manufacture/soldering/wave_soldering/wave_soldering.php
- [30] Wave soldering. *Martin Tarr (Associates)* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www.mtarr.co.uk/courses/topics/0225_wave/
- [31] *Pájení v elektrotechnické výrobě* [online]. Brno [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L04b_p%C3%A1jen%C3%AD_a_kontrola.pdf. Laboratorní cvičení. FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.

[32] Základní typy pájecích vln. *DPS: Elektronika od A do Z* [online]. Liberec, 2011 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:5318/zakladni-typy-pajecich-vln>

[33] *Technologické aspekty bezolovnatého pájení v mikroelektronice: Unleaded solder technological aspects in microelectronics* [online]. Zlín, 2007 [cit. 2016-05-15].

Dostupné z:

http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/4703/kou%C5%99il_2007_bp.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. Petr Neumann Ph.D.

[34] *Optimalizace procesu strojního pájení vlnou* [online]. Brno, 2009 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18283.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.

[35] *Pájení v elektronice* [online]. 2007 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z:

https://is.muni.cz/el/1441/jaro2007/Fy2BP_ENKA/um/09_Pajeni_v_elektronice.pdf?lang=cs

[36] *Možné chyby a kontrolní metody v elektrotechnické montáži* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/24080/F3-BP-2014-Slavata-Michal-prace.pdf?sequence=3>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Karel Dušek, Ph.D.

[37] JUDD, Mike. a Keith. BRINDLEY. *Soldering in electronics assembly*. 2nd ed. Boston: Newnes, 1999. ISBN 0750635452.

[38] *Tavidlové zbytky po pájení přetavení* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-05-15].

Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=58268.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.

[39] Hot Bar Reflow Soldering. *AMADA MIYACHI EUROPE* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.amadamiyachieurope.com/technologies/hot-bar-reflow-soldering/>

[40] JANÁČ, Martin. *Technologie tisku pájecí pasty: Soldering Paste Printing Technology* [online]. Zlín, 2011 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z:

http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/17507/jan%C3%A1%C4%8D_2011_bp.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované elektroniky. Vedoucí práce Ing. Petr Neumann Ph.D.

[41] HLÍNA, Jiří. *Aditivní metody vytváření obrazců na substráty pro senzorické aplikace* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z:

https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/8239/BP_Hlina_Jiri.pdf?sequence=1.

Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Karel Hromádka.

[42] *Studium růstu whiskerů: Study of whisker growth* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/23424/F3-DP-2014-Vavra-Jan-prace.pdf?sequence=3>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Karel Dušek, Ph.D.

[43] Pájení v parách. WEB OK2IMH [online]. 2007 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.ok2imh.com/view.php?cisloclanku=2007040005>

[44] *Technologie pájení přetavením: Reflow Soldering Technology* [online]. Zlín, 2010 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/11540/fil%C3%A1kov%C3%A1_2010_bp.pdf?sequence=1

[45] Pájení v parách. *SMT centrum: Služby v oblasti pájení a spolehlivosti povrchové montáže* [online]. 2010 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-v-parach/pajeni-v-parach/>

[46] Total Heating Methods. *Renesas* [online]. Hong Kong [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://hk.renesas.com/products/package/manual/1/1_1/1_1_4/index.jsp

[47] Pájení Laserem – 93* (ostatní způsoby). Dostupné z: <related:homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-19-93laser.pdf>

[48] Laser. Wikipedie: Otevřená encyklopedie [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>

[49] VLK, Miroslav. *Metody optického testování osazení desek plošných spojů* [online]. České Budějovice, 2012 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: https://theses.cz/id/2j0ij4/Bakalsk_prce_Miroslav_Vlk.pdf. Bakalářská práce.

[50] MACH, Petr. Modifikovaná elektricky vodivá lepidla. *Electroscope* [online]. 2009, (2), 4 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/528/r3c2c7.pdf?sequence=1>

[51] Electrically Conductive Adhesives. *Adhesives & Sealants Industry (ASI)* [online]. Troy, 2004 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.adhesivesmag.com/articles/84628-electrically-conductive-adhesives-1>

[52] ŽÁK, Pavel Ing. *Spolehlivostní rizika bezolovnatých druhů montáže* [online]. Praha, 2012 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://technology.feld.cvut.cz:8080/xwiki/bin/download/K13113/Diserta%C4%8Dn%C3%AD+pr%C3%A1ce/zakpavel-disertacniprace.pdf>. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.

[53] Adhezivní technologie. *ABE.TEC: Vybavení provozoven firem* [online]. Ostřešany, 2014 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.abetec.cz/procesy-v-mikromontazi/adhezivni-technologie/>

[54] LI, Yi., Daniel. LU a C. P. WONG. *Electrical conductive adhesives with nanotechnologies*. London: Springer, c2010. ISBN 03-878-8782-2.

[55] *Propojování v elektronice* [online]. Brno [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/08a_propojovani_v_elektronice.pdf. Výuková prezentace.

[56] ŠPIROCH, Jiří. *Vodivé lepení v elektrotechnice* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/18838/BP_Vodive%20lepeni_Spiroch_Jiri.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: HISTORICKÁ PÁJEČKA	11
OBRÁZEK 2: PÁJENÝ SPOJ.....	12
OBRÁZEK 3: PŘÍKLAD SYSTÉMU PRO ČISTĚNÍ DESEK ZA POMOCÍ VODY	17
OBRÁZEK 4: STYKOVÝ ÚHEL PRO SMÁČIVÝ A NESMÁČIVÝ SPOJ	17
OBRÁZEK 5: PRŮBĚH STÁRNUTÍ V INTERMETALICKÉ ZÓNĚ Cu_6Sn_5	19
OBRÁZEK 6: DIAGRAM METOD ZKOUŠEK PÁJITELNOSTI	21
OBRÁZEK 7: KŘIVKA ROVNOVÁHY METODY SMÁČECÍCH VAH	22
OBRÁZEK 8: PŘÍKLADY RŮZNÝCH PRŮBĚHŮ SMÁČECÍCH SIL.....	23
OBRÁZEK 9: ZNÁZORNĚNÍ KULIČKOVÉHO TESTU VE TŘECH BODECH	23
OBRÁZEK 10: PŘÍKLAD ROZTĚKAVOSTI, KDE SE PÁJECÍ SLITINA ROZTEČE O URČITÉ VÝŠCE H A DÉLCE D1	24
OBRÁZEK 11: VZÁJEMNÉ PŮSOBENÍ CHYB.....	24
OBRÁZEK 12: PROCES OXIDACE U ŽELEZA.....	25
OBRÁZEK 13: ZNÁZORNĚNÍ TOMBSTONINGU.....	26
OBRÁZEK 14: SPRÁVNĚ A NESPRÁVNĚ ROZLITÝ PÁJENÝ SPOJ, VLEVO SPRÁVNĚ, VPRAVO NESPRÁVNĚ.....	29
OBRÁZEK 15: TRANSFORMAČNÍ PÁJEČKA.....	29
OBRÁZEK 16: SESTAVA PÁJECÍ STANICE.....	30
OBRÁZEK 17: PROCES STROJNÍHO PÁJENÍ VLNOU	31
OBRÁZEK 18: VLNY SPADAJÍCÍ DO SKUPINY A	32
OBRÁZEK 19: VLNY SPADAJÍCÍ DO SKUPINY B	32
OBRÁZEK 20: JEDNODUCHÁ VLNA.....	33
OBRÁZEK 21: DVOJITÁ VLNA	34
OBRÁZEK 22: DUTÁ VLNA	35
OBRÁZEK 23: PRINCIP ŠABLONOVÉHO TISKU.....	36
OBRÁZEK 24: PRINCIP PÁJENÍ ZA POMOCÍ HORKÉHO VZDUCHU	37
OBRÁZEK 25: PRINCIP PÁJENÍ V HORKÝCH PARÁCH.....	38
OBRÁZEK 26: PRINCIP PÁJENÍ IR ZÁŘENÍM	38
OBRÁZEK 27: PRINCIP LASERU	39
OBRÁZEK 28: ZÁVISLOST VODIVOSTI NA KONCENTRACI ČÁSTIC V IZOLAČNÍ MATRICI	42
OBRÁZEK 29: NANÁŠENÍ IZOTROPNÍCH LEPIDEL	42
OBRÁZEK 30: OBJEMOVÝ PODÍL PLNIVA V ZÁVISLOSTI NA REZISTIVITĚ	43
OBRÁZEK 31: PŘIPOJENÍ ČIPŮ ZA POMOCÍ TECHNOLOGIE ACF	44
OBRÁZEK 32: PŘIPOJENÍ ČIPŮ ZA POMOCÍ TECHNOLOGIE ACP	44

Seznam tabulek

TABULKA 1: TABULKA TEPLOT PRO IDEÁLNÍ RUČNÍ MONTÁŽ/DEMONTÁŽ PÁJENÉHO SPOJE	14
TABULKA 2: KLASIFIKACE TAVIDEL PODLE NORMY EN 9454-1	15
TABULKA 3: SROVNÁNÍ VODIVÝCH LEPIDEL.....	45
TABULKA 4: SROVNÁVACÍ TABULKA.....	46