

# **Technologické aspekty bezolovnatého pájení v mikroelektronice**

Unleaded solder technological aspects in microelectronics

Michal Kouřil

---

Bakalářská práce  
2007



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav aplikované informatiky  
akademický rok: 2006/2007

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal KOUŘIL**  
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Informační technologie**

Téma práce: **Technologické aspekty bezolovnatého pájení  
v mikroelektronice**

Zásady pro vypracování:

1. Prostudovat dostupnou firemní literaturu a informační nabídku internetových portálů v oboru bezolovnatého pájení
2. Zpracovat získané materiály ve formě elektronické příručky poskytující údaje o problematice bezolovnatého pájení s důrazem na specifika tohoto procesu ve srovnání s pájením olovnatými pájkami. Věnovat se i typickým poruchám tohoto procesu, jejich příčinám, pokud jsou uváděny.
3. Práci tematicky rozdělit na problematiku pájení s bezolovnatou pájecí pastou a na bezolovnaté pájení vlnou
4. Pojednání o problematice bezolovnatého pájení doplnit prezentací v programu PowerPoint koncipovanou jako školicí pomůcku

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Abel,M.: SMT -- Technologie povrchové montáže, Nakladatelství Platan, 2000
2. Hwang,J.: Environment -- Friendly Electronics: Lead Free Technology. Electrochemical Publications, 2001
3. Lea,C.: A Scientific Guide To Surface Mount Technology. Electrochemical Publications, 1988
4. Wassing,R.J.K.: Soldering In Electronics. Electrochemical Publications, 1984
5. Internetové zdroje: [www.nist.gov](http://www.nist.gov) a další dle tématu

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Petr Neumann, Ph.D.**

Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

**13. února 2007**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**24. května 2007**

Ve Zlíně dne 13. února 2007



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Ivan Zelinka, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Hlavním cílem této bakalářské práce je pojednání o problematice bezolovnatého pájení. Důraz je kladen především na specifika tohoto procesu ve srovnání s pájením olovnatými pájkami. Práce je tematicky dělena na problematiku pájení s bezolovnatou pájecí pastou a na bezolovnaté pájení vlnou. Posledním bodem je popis zavedení bezolovnatého pájení.

Klíčová slova:

Bezolovnaté pájení, pájky, SMT

## **ABSTRACT**

Main goal of this thesis is discussion about unleaded soldering. The thesis trying to emphasis the specifics of the process compare to lead soldering. The thesis is thematically divided into soldering with solder paste and unleaded soldering by “wave”. The thesis was enhanced by problematic of manual soldering which is considered as equally important. Last section is focused on unleaded soldering implementation

Keywords:

Unleaded soldering, soldering, SMT

### **Poděkování**

Děkuji panu Ing. Petru Neumannovi PhD. za poskytnuté rady, cenné připomínky i trpělivost při vedení bakalářské práce.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....  
Podpis diplomanta

## OBSAH

ÚVOD.....	8
<b>1 MĚKKÉ PÁJENÍ .....</b>	<b>11</b>
1.1 TEORIE MĚKKÉHO PÁJENÍ .....	12
1.1.1 Pájitelnost .....	12
1.1.2 Pájecí tavidla a jejich účinnost .....	13
1.1.3 Problémy pájitelnosti.....	14
1.1.4 Kritéria pro pájený spoj.....	15
1.1.4.1 Jakost pájeného spoje .....	16
1.1.4.2 Životnost pájených spojů.....	16
1.2 STROJNÍ PÁJENÍ VLNOU .....	17
1.2.1 Jednotlivé operace při pájení vlnou.....	17
1.2.2 Ochrana roztavené pájecí slitiny .....	21
1.2.2.1 Použití pájecího oleje .....	21
1.2.2.2 Ochrana inertním plynem .....	21
1.2.3 Jednoduchá vlna .....	21
1.2.4 Dvojitá vlna .....	22
1.2.5 Dutá vlna.....	24
1.3 PÁJENÍ PŘETAVERNÍM .....	25
1.3.1 Pájecí pasty .....	25
1.3.2 Nanášení pájecí pasty .....	28
1.3.2.1 Nanášení pájecí pasty dávkováním.....	28
1.3.2.2 Tisk přes síto – sítotisk .....	29
1.3.2.3 Tisk přes šablonu .....	30
1.3.3 Metody přetavení.....	32
1.3.3.1 Pájení v páře .....	32
1.3.3.2 Přetavení infračerveným zářením.....	32
1.3.3.3 Nucené proudění.....	34
1.3.4 Teplotní profil.....	35
<b>2 PÁJECÍ SLITINY.....</b>	<b>37</b>
2.1 SLITINY CÍN – OLOVNATÉ .....	37
2.1.1 Fázový diagram.....	37
2.1.2 Podvojně slitiny .....	38
2.1.3 Čistota pájecí slitiny .....	39
2.2 SLITINY BEZOLOVNATÉ.....	39

2.2.1	Použitelné bezolovnaté slitiny .....	40
1.	Sn96,5 /Ag3,5 (Sn96/Ag4) .....	40
2.	Sn99,3/Cu0,7 (Sn99/Cu).....	40
3.	Sn/Ag/Cu .....	40
4.	Sn/Ag/Bi/X .....	40
5.	Sn/Sb.....	40
6.	Sn/Zn/X .....	40
7.	Sn/Bi .....	40
2.2.2	Shrnutí .....	41
2.2.3	Čistota pájecí slitiny .....	42
2.2.4	Mechanické vlastnosti bezolovnatých slitin.....	43
<b>3</b>	<b>PROBLEMATIKA BEZOLOVNATÉHO PÁJENÍ.....</b>	<b>44</b>
3.1	PÁJENÍ VLNOU.....	44
3.1.1	Základní odlišnosti při bezolovnatém pájení vlnou.....	44
3.1.2	Změny v konstrukci pájecích vln.....	46
3.1.3	Teplotní profil při pájení .....	47
3.1.4	Parametr.....	49
3.1.4.1	Slitiny Sn/Pb.....	49
3.1.4.2	Slitiny Bi.....	49
3.1.5	Chyby při bezolovnatém pájení vlnou .....	50
3.1.6	Optimalizace pájení vlnou pro bezolovnatou technologii .....	51
3.2	PÁJENÍ PŘETAVERNÍM .....	52
3.2.1	Tisk bezolovnatých past .....	52
3.2.2	Tepelné zpracování bezolovnatých pájek.....	52
3.2.3	Přetavovací pece pro bezolovnaté přetavení .....	54
3.2.4	Teplotní profil pro pájení přetavením .....	55
3.2.5	Typické chyby při bezolovnatém pájení přetavením.....	58
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>60</b>
	<b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>66</b>

## ÚVOD

Zavedení bezolovnatého pájení je úzce spjato s ochranou životního prostředí. V posledních letech jeho zavádění dosahuje celosvětové úrovně. Hlavním důvodem pro zavedení bezolovnatého pájení byl fakt, že olovo nelze z vyřazených přístrojů recyklovat. Recyklace je značně ztížena potřebami trhu, jež požaduje miniaturizaci výrobků, ale také zvýšení množství funkcí, kapacity, rychlosti komunikace a přenosu dat výrobků, v nichž jsou tyto součástky instalovány.

Již v roce 2003 bylo v EU vyprodukováno přes 6 mil. tun elektronického odpadu, proto je nutné, aby byl tento odpad bezpečně likvidován. Posun osazených substrátů k vyšší montážní hustotě a požadavky na snižování nákladů znesnadňují recyklaci použitých elektronických zařízení.

Odložená elektronická zařízení se z části shromažďují, zatímco osazené substráty se drtí a odkládají na skládky, většinou bez opětného získávání surovin nebo zůstává odpad v přírodě tak jak je, pouze volně položený.

Olovo se vzhledem ke své povaze postupně rozpouští v kyselém dešti, jenž je považován za důsledek znečištění atmosféry. Kyselý déšť působí na olovo tak, že vytvoří sloučeninu rozpustnou ve vodě.

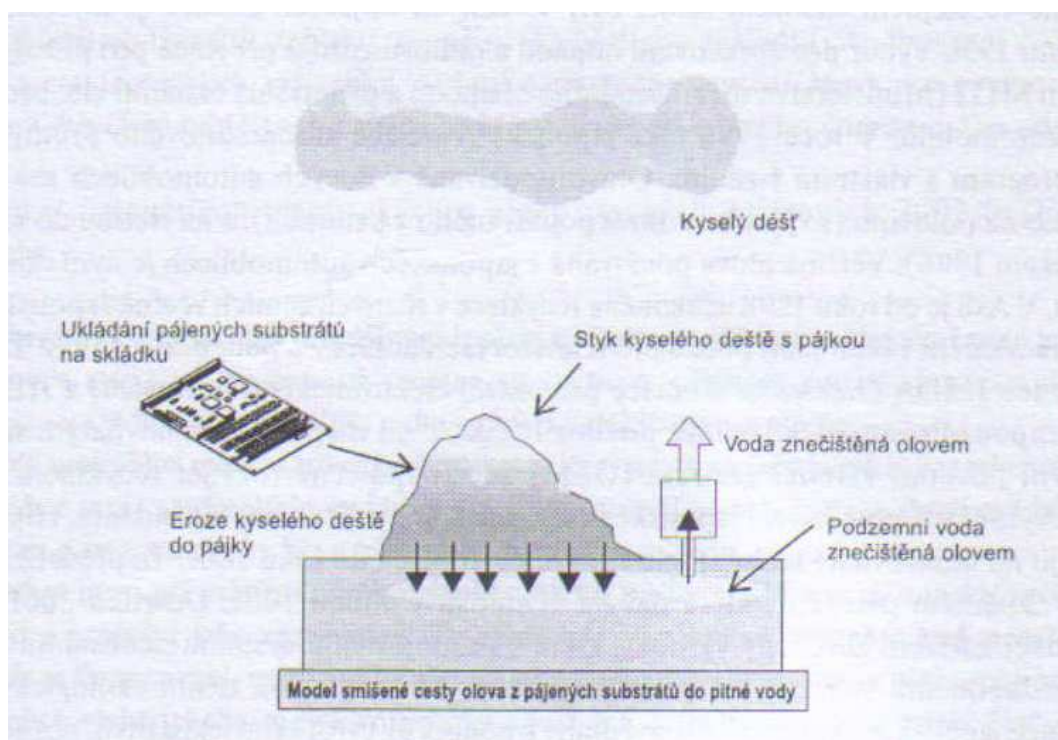
Pokud se dostanou desky plošných spojů na skládky, hrozí nebezpečí kontaminace spodních i povrchových vod<sup>1</sup>. Olovo v lidském těle pak způsobuje vážná onemocnění jako například nemoci jater nebo nevratné poškození mozku. Olovo je také kvalifikováno jako karcinogen.

Podle legislativy Evropské unie vstoupilo k datu 1.7.2006 ve všeobecnou platnost nařízení týkající se stažení všech zařízení z vnitřního trhu, která obsahují větší než povolené množství některé nebezpečné látky. Za nebezpečné látky jsou považovány především těžké kovy, mezi které patří také olovo.

---

<sup>1</sup> Viz obrázek č. 1





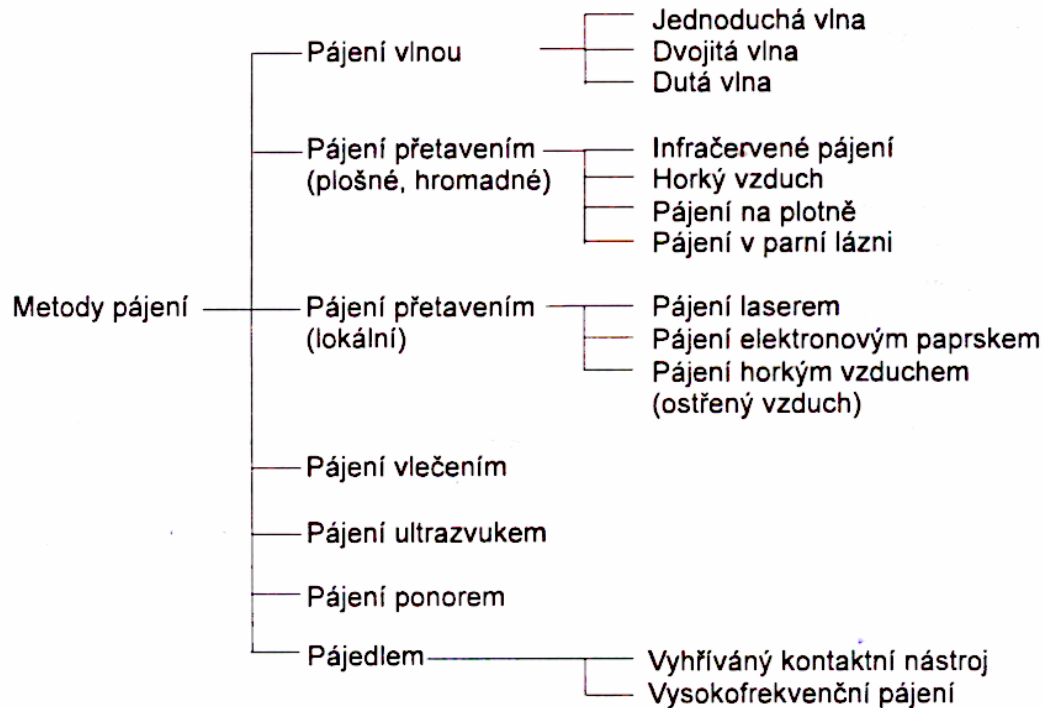
Obrázek 1: Model smíšené cesty olova z pájených substrátů do pitné vody

V elektronice se toto nařízení, vycházející z ekologických norem ECO a dalších souvisejících norem WEEE, výrazně dotýká olovnatých pájek, které jsou po dlouhá léta neodmyslitelným a velmi používaným materiálem při výrobě elektronických a elektrotechnických zařízení. Od ledna 2006 se platí za likvidaci elektronického zařízení.

Ve světě je náhrada bezolovnatých pájek řešena na kontinentálních úrovních. USA již v roce 1993 zavedlo poplatky za používání vybraných škodlivých látek, mezi něž patří rovněž olovnaté pájky. Proto v USA vznikl enormní zájem o nahrazení olovnatých pájek bezolovnatými. Japonsko již před léty nastoupilo vlastní cestu k omezení olovnatých pájek a firmy postupně přecházejí k ekologickým bezolovnatým pájkám. Velmi důležitý z celosvětového hlediska bude, jaký postoj k bezolovnatému pájení zaujme jeden z největších světových producentů elektrotechnických výrobků – Čína. Podle známých informací se i v této zemi připravuje vyloučení olova z elektrotechnické výroby a to časovým souladu s legislativou v EU. To je jeden z zásadních kroků, který podstatně ovlivní postoj a přístup k bezolovnatému pájení ostatních zemí.

Všeobecně se předpokládá velký zájem o přechod na bezolovnaté pájení z důvodu ověření konkurenčních výhod u výrobků, které nezatěžují životní prostředí tzv. (green product). Během posledních dvou let byl zjištěn zvýšený prodej výrobků s již zmíněným označením o 10-20% v porovnání s ostatními (neekologickými) produkty, což dokazuje ekologické smýšlení obyvatel. Zavedení bezolovnatého pájení v sobě skrývá i řadu problémů, které je nutné při dodržení požadované jakosti dodržet. Jedná se především o materiály pájek, vyšší energetickou náročnost při jejich tavení a udržení optimální teploty při zpracovávání bezolovnatých pájek dále nutnost úprav výrobních zařízení a v neposlední řadě přeškolení lidských zdrojů na nové postupy a obsluhu výrobního zařízení. Vyloučení olovnatého pájení je jednou z dalších cest k ochraně životního prostředí a všech forem života včetně lidské populace. Elektrotechnika je jednou z nejdynamičtěji se rozvíjejících odvětví lidské činnosti, proto si velkou pozornost zaslouží právě ekologické dopady mající vliv na životní prostředí.

## 1 MĚKKÉ PÁJENÍ



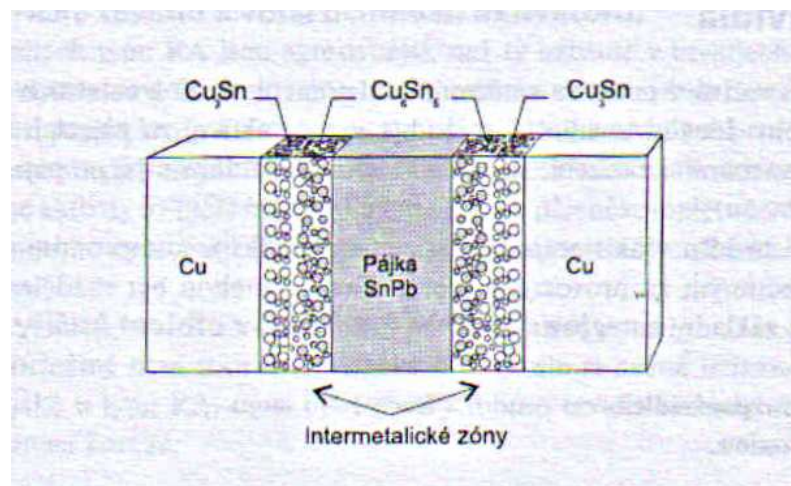
Obrázek 2: Metody pájení

Při bližším pohledu na jednotlivé pájecí metody je vidět, že se liší způsobem, jímž je pájka přiváděna do spoje a typem přenosu tepla. Při pájení vlnou, namáčením a vlečením se tekutá pájka přivádí na spoj z pájecí lázně. Další techniky využívají pájky dodané na spoj před pájením ve formě pájecí pasty, která se roztaví a vytvoří pájecí spoj. V určitých případech je možno provést přetavení bez dodání dodatečné pájky a použije se pájka na vývodech součástky. To znamená, že části, které mají být spojeny se nejprve pokryjí slitinou pájky a tato pájka se později přetaví.

Nejvíce jsou používány tři metody pájení a to pájedlem, vlnou a přetavením. Tyto techniky pokrývají téměř veškeré požadavky elektrotechnického průmyslu.

## 1.1 Teorie měkkého pájení

Pájení je způsob metalurgického spojování dvou kovů třetím roztaveným kovem – pájkou. Povrchové atomy základního materiálu se dostanou do styku s atomy roztavené pájky v takové vzdálenosti, že se vytvoří podmínky pro účinek adhezních a kohezních sil (adheze = přilnavost, koheze = soudržnost). Současně dochází k rozpuštění a difúzi některých prvků spojovaných materiálů. Vzniká tak mezifázové rozhraní mezi pevným a tekutým kovem. Ve většině případů vznikají přechodové oblasti o určité tloušťce, které mají jiné mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti.



Obrázek 3: Intermetalický spoj

### 1.1.1 Pájitelnost

Pájené komponenty nestačí pouze zahřát na požadovanou teplotu a dodat pájku, ale pájené komponenty je třeba připravit – musí mít vyhovující pájitelnost. Termín pájitelnost povrchu je použit jako popis schopnosti povrchu být smáčitelný pájkou během procesu pájení. Je to funkce přesného procesu a práce materiálu, kontakt může vykazovat přijatelnou pájitelnost v některých procesech, ale v jiných ne.

Stupně smáčení jsou:<sup>2</sup>

- Nesmáčení

<sup>2</sup> Podrobněji viz. příložená rozšiřující verze bakalářské práce

- Smáčení
- Odsmačení

### 1.1.2 Pájecí tavidla a jejich účinnost

Smysl tavidla spočívá v podpoře smáčení, v odstranění oxidů a ostatních nečistot z povrchů, které mají být spojeny. Ideální tavidlo by mělo být vysoce aktivní za pájecích teplot a nečinné za normálních teplot pracovního zařízení, aby nebylo nutné jej odstraňovat po pájení.

Takové ideální tavidlo však neexistuje. Skutečné tavidlo je kompromisem mezi aktivním za pájecích teplot a nečinným za provozních teplot.

Účinnost tavidla je míra jeho schopnosti podpořit smáčivost povrchů určených k pájení. Je kombinací aktivity tavidla (jeho základní vlastnost čistit povrchy) a jeho stability (čas, během kterého udržuje aktivitu za pájecích teplot). Účinnost jednotlivých tavidel závisí na specifické pájecí operaci. Vysoce aktivní tavidlo se rychle rozpadá, může být vhodné např. při pájení vlnou trvající pouze několik sekund, ale ne pro pomalejší procesy přetavení. V druhém případě je to tavidlo, které vyvíjí pomalejší aktivitu, ale udržuje tuto aktivitu po delší časový úsek.

Míra aktivity tavidla je nazývána jako číslo kyselosti. To je počet miligramů hydroxidu draselného nutného pro neutralizaci volných kyselin v 1 gramu tavidla za daných podmínek.

#### **Členění tavidel:<sup>3</sup>**

1. Tavidla rozpustná v rozpouštědle
2. Tavidla rozpustná ve vodě
3. Tavidla bez čištění

---

<sup>3</sup> Podrobnější členění viz. příložená rozšiřující verze bakalářské práce

Klasifikace tavidel dle evropské normy EN 9454-1 je následující:

Klasifikace tavidla			Kód	
Typ tavidla	Základ tavidla	Aktivace tavidla		
1. Pryskyřičná	1.Kalafuna	1.Bez aktivátorů	1.1.1	
			2.Halogeny	1.2.1
			3.Nehalogenové aktivátory	1.1.2
				1.2.2
				1.1.3
	1.2.3			
2.Organická	1.Vodu ředitelná	1.Bez aktivátorů	2.1.2	
	2.Vodou neředitelná	2.Halogeny	2.1.3	
		3.Nehalogenové aktivátory	2.2.2	
			2.2.3	
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.Jiná kyselina	3.2.2	
	3.Alkálie	1.aminy nebo amoniak	3.3.1	

tabulka 1: Klasifikace tavidel

### 1.1.3 Problémy pájitelnosti

Povrchy s cíno-olověnou povrchovou úpravou jsou aplikovány např. pro vývodové součástky a plošné spoje. Díky této úpravě se také udrží odpovídající pájitelnost dokonce po prodlouženém skladování. Cíno-olověná úprava je aplikována na základní kov buď elektropokovováním nebo máčením vývodů v lázni z roztavené pájky. S příchodem bezolovnatých technologií je nutné tyto povrchové úpravy nahradit novými, které musí

ekvivalentně co do vlastností nahradit stávající. Dále uváděné problémy pak budou přetrvávat, některé dokonce ve vyšší míře. Během procesu pájení se mohou vyskytnout problémy s pájitelností. Zde uvádím popis typických případů:<sup>4</sup>

1. Oxidace
2. Znečištění
3. Porézní povrch pájky
4. Nesprávné spojovací metalurgie

#### 1.1.4 Kritéria pro pájený spoj

Jednoznačně je možné dobrý spoj stanovit podle velikosti stykového úhlu. Následující obrázek představuje kritéria pro všechny typy pájených spojů.

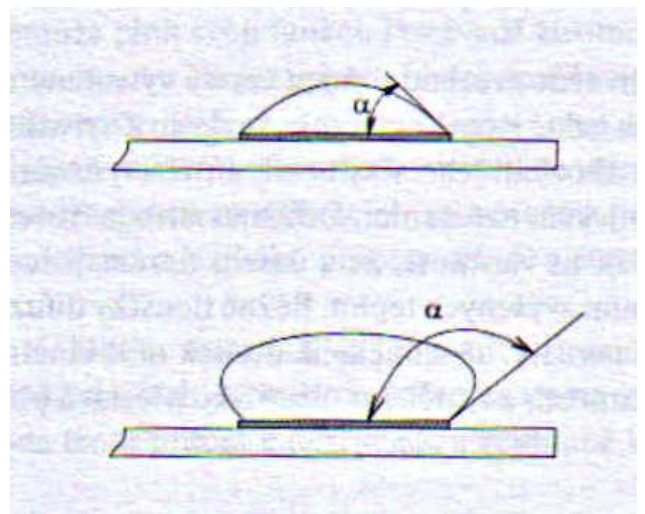
$0^\circ < \alpha < 20^\circ$  - výborné až dokonalé smáčení

$20^\circ < \alpha < 40^\circ$  - dobré až velmi dobré smáčení

$40^\circ < \alpha < 55^\circ$  - postačující smáčení

$55^\circ < \alpha < 90^\circ$  - špatné smáčení

$90^\circ < \alpha$  - nesmáčivost



Obrázek 4: stykový úhel

---

<sup>4</sup> Podrobnější popis problémů viz. příložená rozšiřující verze bakalářské práce

#### **1.1.4.1 Jakost pájeného spoje**

Jakost pájených spojů může být posuzována z různých hledisek. Z funkčního hlediska je ve většině případů rozhodujícím parametrem životnost pájeného spoje. Je to čas, po který je zaručena spolehlivá funkce, to znamená vodivost spoje. To ovlivňuje řada faktorů. Nejzákladnější faktory jsou:

- stárnutí materiálů
- mechanické namáhání
- teplotní namáhání

#### **1.1.4.2 Životnost pájených spojů**

Životnost výrobků je obecně definována dobou po kterou se výrobek opotřebuje na tolik, že nemůže plnit svou funkci. Jelikož životnost systémů se pohybuje v rozmezí několika let, již v minulosti u klasických součástek se zjišťovala pomocí tzv. zrychlených zkoušek. Zrychlené zkoušky simulují pracovní režim za zvýšené teploty resp. V režimu střídání záporných a kladných teplotních hodnot a v případě zvýšené relativní vlhkosti. Tímto procesem se urychluje stárnutí, dochází k simulaci vnitřních jevů v pájených spojích a součástkách nastávajících za běžného provozu čímž se urychlí jejich degradace. Jedná se především o fyzikální procesy difúze a elektrochemický proces koroze.

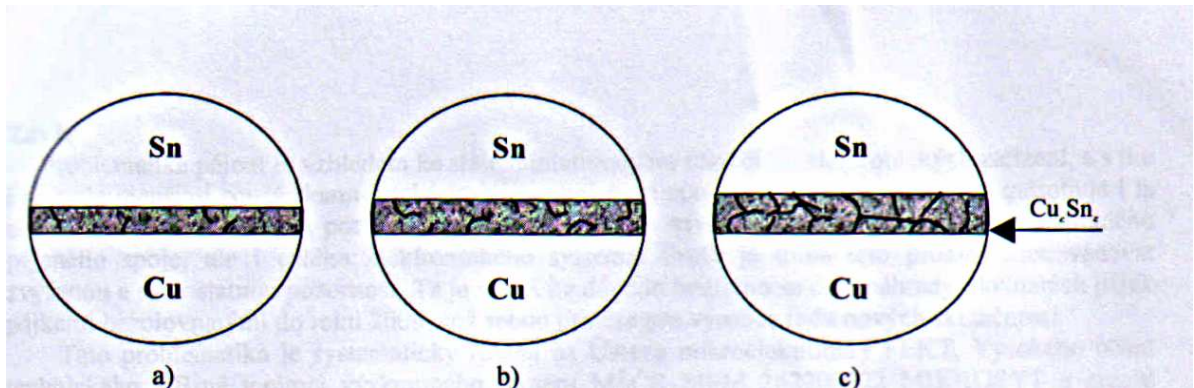
Difúze materiálů se projevuje již zmíněným vznikem intermetalických slutin a jejich neustálým nárůstem. Tyto vrstvy vykazují horší elektrické vlastnosti, především vodivost, vede tento proces k degradaci a postupné nefunkčnosti spoje.

Elektrochemická koroze mění vlastnosti materiálů spoje, především narušuje jeho homogenitu, zhoršuje adhezi a rovněž vede k jeho destrukci.

Vznik difúzní vrstvy je z hlediska vytvoření spoje nezbytným průvodním jevem, ovšem s rostoucí tloušťkou klesá pevnost spoje. Nadměrný růst této vrstvy může být vyvolán buď v samotném počátku vzniku spoje při ohřevu, nebo potom ohřevem spoje v průběhu provozu.

Nárůst difúzní vrstvy probíhá především na úkor cínu a tím dochází k postupnému úbytku samotného pájeného spoje a tím způsobené zhoršení elektrických a mechanických vlastností spoje vedoucí až k postupné nefunkčnosti.





a, ve vrstvě se objevují trhliny

b, vrstva roste, trhlín přibývá a zvětšují se

c, vrstva a trhliny jsou natolik velké, že může dojít až k nefunkčnosti spoje

Obrázek 5 : Trhliny vrstvy

Kritická místa jsou především na kraji struktury  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Zde se stárnutím a namáháním projevuje nejen samotným růstem vrstvy, ale i vznikem trhlín v této struktuře. Čím více trhlín se ve vrstvě objevuje, tím vzniká větší přechodový odpor, který způsobuje vyšší tepelné namáhání spoje a vrstva i trhliny se dále rozšiřují.

## 1.2 Strojní pájení vlnou

### 1.2.1 Jednotlivé operace při pájení vlnou

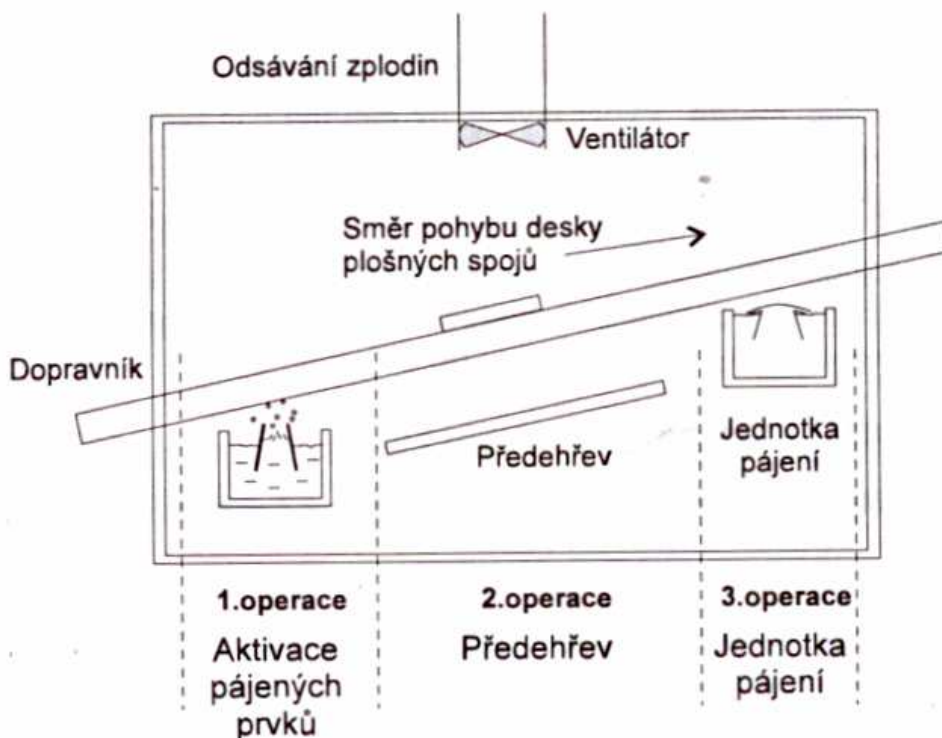
Vlastní proces není pouze smáčení objektů určených k zapájení v pájecí slitině jak by se mohlo na první pohled jevit. Jde o další operace které je nutné udělat a při tom dodržet stanovené podmínky.

Proces pájení dělíme do tří operací:

- **Aktivace** pájených prvků – nejprve je nutné vhodně připravit všechny potřebné předměty k pájení tak, aby samotný proces proběhl co nejlépe. Základním problémem je omezení vlivu oxidů, které vznikají jak na povrchu cínové lázně, tak jsou přítomny na pájecích prvcích.

- **Přehřev** desky plošných spojů se součástkami na teplotu okolo 100°C, aby nedošlo k nežádoucímu tepelnému šoku při kontaktu desky s roztavenou pájkou.
- **Vlastní pájení** vlnou – spojní dvou kovů (součástka a vodivý spoj desky plošných spojů) roztaveným kovem –pájecí slitinou.

Konstrukčně musí všechna zařízení pro jednotlivé operace splňovat podmínky požární ochrany a hygieny práce. To samozřejmě předpokládá použití vhodného odsávacího systému a filtrů, který zajistí dokonalý odsun zplodin ze zařízení. Provozní místnost by měla být podle toho upravena. Je třeba mít na paměti, že se pracuje s hořlavinami a teplota v zařízení dosahuje až 260°C. Tomu všemu musí patřičně odpovídat požární opatření, organizace práce na pracovišti a proškolení obsluhy.

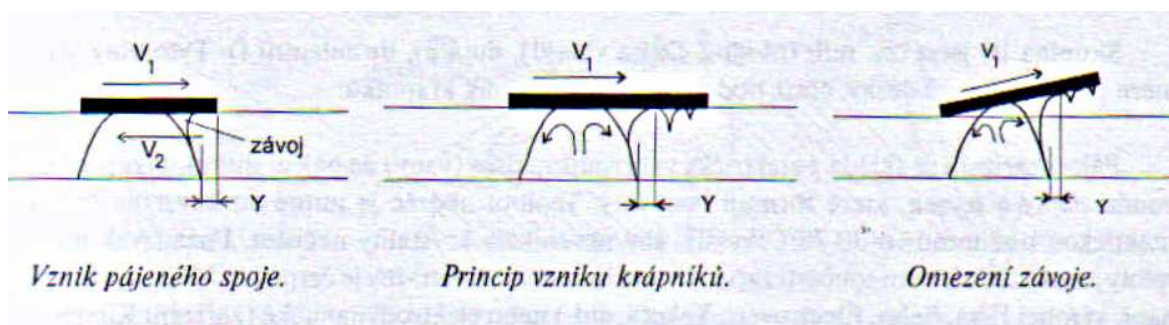


Obrázek 6: Jednotlivé operace strojního pájení

Pohybující se slitina umožňuje proniknout tlakem a kapilárními silami otvory vícevrstevných desek, a tak vytvořit pájecí kužel i na straně součástek. Neustálý pohyb vlny zajišťuje, že vrchol vlny je bez oxidů a tudíž nedochází k znehodnocování pájených míst.

Samozřejmě tento systém má i nevýhody, které není možné opomenout. Strojně pájený spoj vzniká průchodem desky vrcholem vlny. První konstrukce pájecí vlny se snažily držet dopravník ve vodorovné poloze. Při vodorovné konfiguraci dopravníku a vlny a při určité rychlosti dopravníku  $V_1$  a rychlosti vlny  $V_2$  nestačí pájka dostatečně rychle stéci zpět do vlny a vytváří závoj Y, který vede ke vzniku krápníků a můsteků. Zde platí zásada, že  $V_2 > V_1$ . Rychlost  $V_2$  je možné zvýšit tím, že se zvýší teplota pájky, čímž se sníží její povrchové napětí. V praxi se často nedaří všechny podmínky splnit.

Velikost závoje Y lze s úspěchem snížit nakloněním dopravníku o  $4^\circ - 8^\circ$ . Nakloněním pájené desky se podstatně podpoří stékání pájky ze závoje do vlny (hodnota Y se zmenší).



Obrázek 7: Naklonění pájené desky

### Připouštění oleje

Další metodou vedoucí ke snížení závoje Y je připouštění oleje do vlny. Tímto se snižuje povrchové napětí. Povrch pájených spojů je vzhlednější. Připouštění oleje do vlny znamená dostat olej přímo do pájeného místa v okamžiku setkání pájecí slitiny s pájenými prvky. Bohužel tato metoda je hodně kritizovaná ze strany výrobců bezoplachových tavidel, protože případný zbytky oleje je nutné odstranit, čímž se neguje princip těchto tavidel.

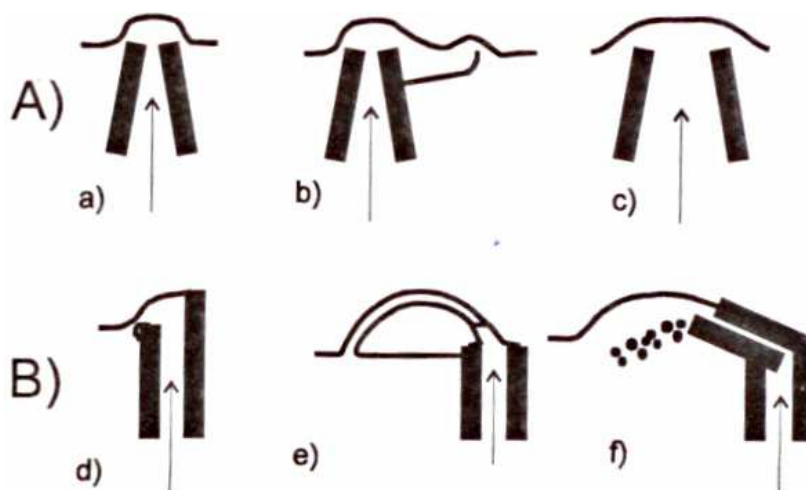
### Konstrukce vlny

Z výše uvedených informací je zřejmé, že snahou výrobců pájecích vln je konstruovat takové vlny, které by uspokojily zákazníka co nejvíce. Pokud se jedná o klasickou montáž u vícevrstevných desek s požadavkem dokonalého prohrátí desky a vytvoření správného kužele i na straně součástek, není velkým problémem pájet tyto desky i na menších zařízeních s jednoduchou vlnou. Významnější problémy nastávají a nástupem

vyšší integrace součástek a samozřejmě se SMD. Zde se již pouze s jednoduchou vlnou nevystačí a je nutné kombinovat ji s některou z reflexních vln.

Skupina A) tvoří oboustranné vlny. Elektromechanickým čerpadlem je vháněna slitina do trysky, která pak přetéká přes její okraj a tvoří požadovaný tvar. Typ a) a c) je jednoduchá vlna nejčastěji používaného typu. Je k vidění u převážné většiny pájecích zařízení. Typ b) je snaha vytvořit tzv. dvojistou vlnu jednou tryskou. Snížená druhá vlna sníží vznik krápníků. Touto skupinou není problém pájet klasickou montáž na jednostranných i vícestranných deskách s pokovenými otvory.

Skupina B) jsou tzv. reflexní vlny Delta vlna d), dutá vlna e) turbulentní vlna f). Tyto vlny jdou proti směru pohybu pájené desky, čímž podstatně omezují vznik krápníků.



Obrázek 8 : Typy vln

Pájecí zařízení se skládá z elektricky vyhřívané nádrže (vany) na pájecí slitinu, z čerpadla, vedení proudu pájky a trysek, které formují tvar vlny. Teplotu nádrže je nutné udržovat na teplotě nad eutektickou hodnotou (o 30-70°C vyšší), aby nevznikaly krystaly nečistot. Požadavek na udržení teploty je asi  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Zařízení jež umožňuje vzednutí vlny je čerpadlo. Může být mechanické nebo elektrodynamické. Dnes jsou stroje na vlny vyráběny v různých velikostech od stolních zařízení šíře cca 20 cm až po velké mohutné stroje o šíři 50 cm. Množství slitiny je dáno konstrukcí zařízení kdy standardní zařízení s jednoduchou popř. dvojistou vlnou, mají nejmenší obsah náplně cca 250 kg. Výjimkou

jsou malá stolní zařízení s obsahem kolem 30 kg slitiny. Podstatně menší náplň vyžadují zařízení s elektrodynamickým čerpadlem kde stačí u středních zařízení (šíře cca 35 cm ) 40 kg slitiny. Malé množství náplně je dáno odlišností konstrukce.

## 1.2.2 Ochrana roztavené pájecí slitiny

### 1.2.2.1 Použití pájecího oleje

Používání pájecího oleje při pájení vlnou je dlouhá léta diskutovaná otázka, která ani v současné době není vždy zcela objektivně posuzována. Ve většině případů výrobce či obchodník zastává tu variantu, která je používána na jím prodávaném stroji.

#### Pájení bez oleje

#### Pájení bez oleje – pájecí olej kryje lázeň pájky

#### Pájení s olejem- pájecí olej připouštěn do vlny

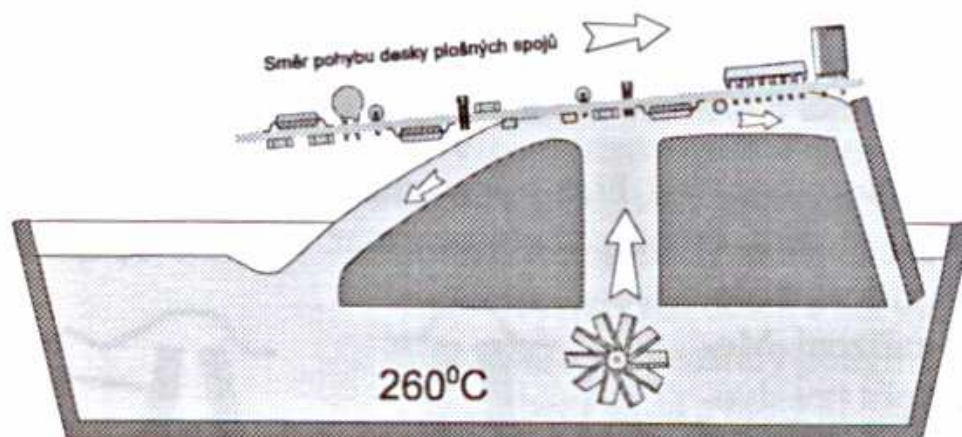
### 1.2.2.2 Ochrana inertním plynem

Nejčastěji používaným inertním plynem je dusík, který nabízí řešení věčné otázky o použití oleje. Inertní plyn dokonale zabrání přístupu vzduchu a tím oxidaci pájecí slitiny. Nemohou vznikat další zbytkové produkty, které by působily korozi. Bezproblémové pájení je však vyváženo vysokými pořizovacími náklady a prostorovou náročností.

## 1.2.3 Jednoduchá vlna

První nejjednodušší z nich je jednoduchá široká vlna. Tento typ je možné sehnat již od velmi jednoduchých stolních zařízení až po velká zařízení.

Na této vlně není problém pájet klasické vývodové součástky i vyšší integrace. Při delších (případně ohnutých) vývodech součástek hrozí nebezpečí tzv. praporků, ale i ty se dají odstranit správným nastavením vlny a dopravníku. SMT je možné pájet, ale pouze velmi nízká integrace a větší součástky. Větší stroje mají poměrně velký obsah pájky. Malé náplně jsou diskutabilní, protože sami prodejci tvrdí, že velký objem je nutný k udržení teplotní stability.



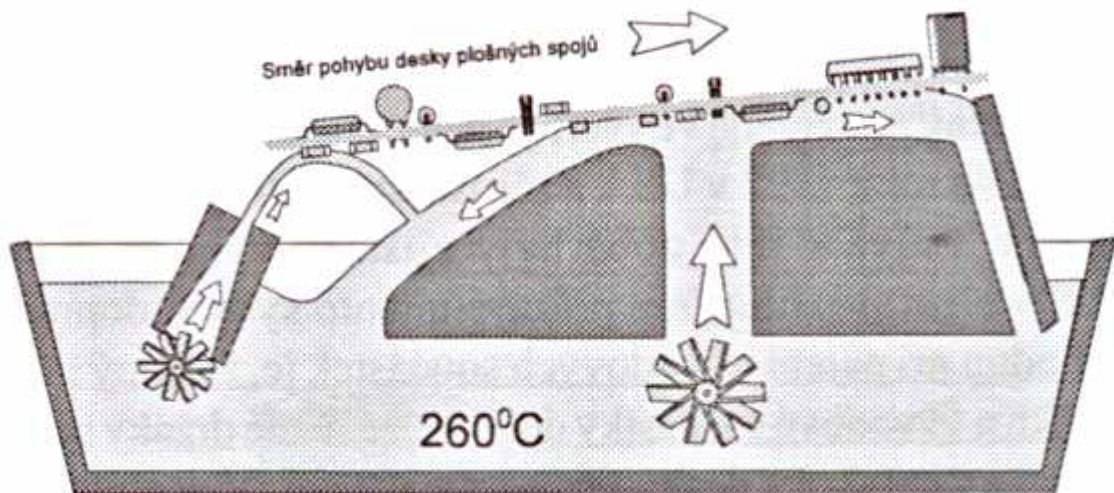
Obrázek 9: Jednoduchá vlna

#### 1.2.4 Dvojitá vlna

Při pájení dvojitou vlnou je funkcí první vlny smočit pájkou všechny součástky a plochy plošných spojů desky. Výskyt zkratů je zde druhořadý a proto musí mít vlna určitý tlak v kontaktní ploše s deskou. Navíc tato vlna musí mít správně definovanou výšku k zabránění přetečení pájky. První tzv. turbulentní vlna proudí ve směru pohybu desky. Druhá široká vlna musí dosáhnout potřebné optimální kvality pájení, tj. bez zkratů. Jedním z důležitých faktorů v určení výsledku je tvar vlny, který musí dovolit poměrný tok, protitok a zastavení vzhledem k rychlosti dopravníku. Složením dvou rozdílných vln je snaha eliminovat nedostatek široké laminární vlny při pájení SMD, kde mohou vzniknout „stíny“ za součástkami, které turbulentní vlna odstraní. Ke zlepšení výsledku může sloužit také horký vzduchový nůž.

Zařízení obsahuje dvě čerpadla z čehož vyplývá nevýhoda nutnosti velkého obsahu pájky a to 250 – 600 kg v závislosti na velikosti zařízení. Další nevýhodou je zatížení součástek teplem protože součástka prochází přes dvě vlny.





Obrázek 10 - Dvojitá pájecí vlna. První vlna je turbulentní, druhá vlna je široká laminární

### Vlastnosti dvojitě vlny

Obecné:

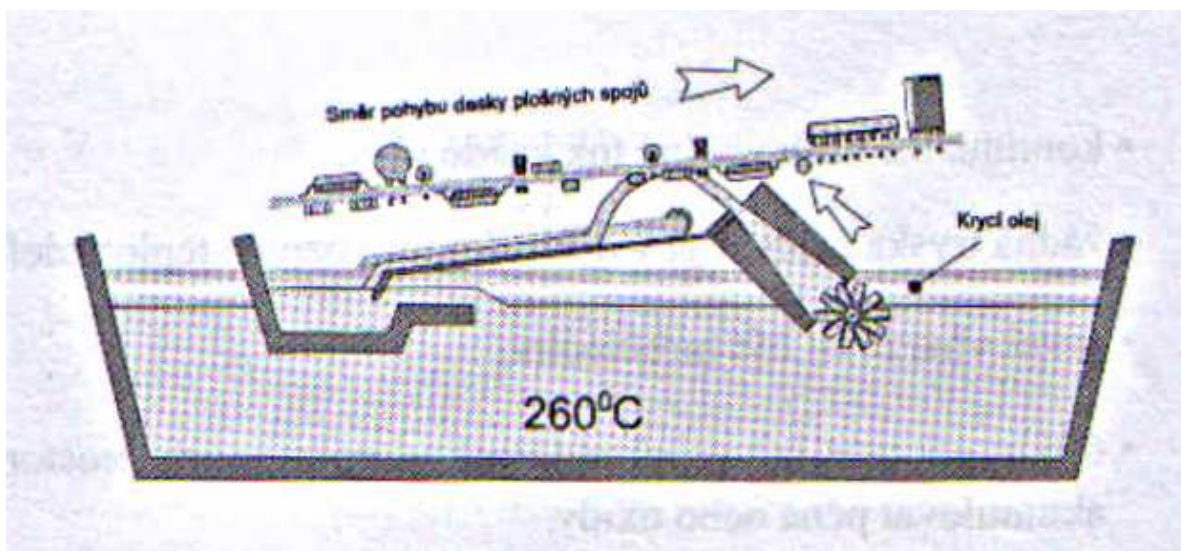
- kontinuálně nastavitelný tok každé vlny
- žádná tryska nesmí být v důsledku provozních teplot zdeformována
- první vlna musí být turbulentní
- ústí trysek musí být volně oddělené od izolovaných prostorů, ve kterých se může akumulovat pěna nebo oxidy
- tvar pájecí vany musí být snadno čistitelný, nejsou povoleny nepřístupné rohy, vyvýšeniny atd.
- první vlna nesmí ovlivnit chování vlny druhé
- pěna mezi vlnami musí mít snadný výstup tak, že nedojde k zanesení
- výška pájecí nádoby musí být nastavitelná
- pokud se dopravník zastaví musí být automaticky zastaveno čerpání i přehřívání
- doporučuje se používat zařízení s digitálním odečtem pro měření výšky každé vlny, které se využívá pro kontrolu systému čerpání
- možnost měnit sklon dopravníku

Teplota:

- čas pro zahřátí pájecí lázně na  $250^{\circ}\text{C} < 2$  hodiny
- pokud se jeden ropný článek porouchá musí ostatní elementy požadovanou teplotu lázně udržet
- teplotní odchylka přes celou šířku vlny musí být co nejmenší
- činnost pump není možná dříve, než je veškerá pájka roztavená. Pumpy musí být vypnuty pokud je teplota nižší než  $220^{\circ}\text{C}$  a vyšší než  $280^{\circ}\text{C}$ .
- termostat musí být schopný přesného nastavení, především v rozsahu  $220 - 280^{\circ}\text{C}$ .

### 1.2.5 Dutá vlna

První pájecí zařízení s dutou vlnou bylo zkonstruováno v USA roku 1892 kdy se používalo k pájení dna konzerv. Po zjištění výhod dynamického přenosu tepla bylo později přepracováno pro použití v elektrotechnickém průmyslu. Nejvýznamnější výhodou při pájení vývodových součástek je, že silný proud slitiny o rychlosti 1 m/s stahuje pájenou desku a vývodové součástky dolů, takže různé držáky nebo ohnuté vývody součástek nejsou nutné. Délka kontaktu s deskou je pouze 1 – 2 cm. V porovnání s jednoduchou vlnou má dutá vlna podstatně vyšší přenos tepla při velmi nízkém tepelném zatížení (10 – 20 % tepelného zatížení jednoduché vlny), protože kontakt trvá 1 – 2 s. To je velmi důležitý parametr zejména v souvislosti s použitím bezolovnatých pájek s vyšší teplotou tavení.



Obrázek 11: Dutá vlna



Zařízení s dutou vlnou jsou velmi široce používána v Japonsku, zatím co u nás určitá tradice a setrvačnost brání k jejím masivnějšímu rozšíření. Zlom by mohl nastat při nutnosti použití bezolovnatých pájek.

### 1.3 Pájení přetavením

Pájení přetavením je významným typem pájení. Princip je opačný než u pájení vlnou kdy se roztavený pájecí materiál přivádí na pájecí místo. Při pájení přetavením se nejprve nanese pájecí materiál na pájené místo a potom se na tento nanesený materiál působí tepelnou energií, při čemž dochází k přetavení pájecího materiálu. Pro kvalitu pájení je důležitým faktorem volba správné metody, stroje a pájecího materiálu – pájecí pasty. Pájením přetavením je možné zpracovat jemné rozteče (až 0,3 mm). Technologie nevyžaduje žádné speciální postupy ochrany součástek proti vniknutí tavidla. Pájecí pasta je zhruba 10 x dražší než pájky v tyčích, používá se strojní přetavení u náročnějších výrobků – většina desek s větší technologickou úrovní. Parametry pájecí pasty jsou klíčové v dosažení bezproblémového pájení s dostatečnou kvalitou.

#### 1.3.1 Pájecí pasty

Pájecí pasty jsou směsí kovové složky – pájecích zrn a organické složky – tavidla. Obvyklé složení pasty je 90% pájecích zrn a 10% tavidla.



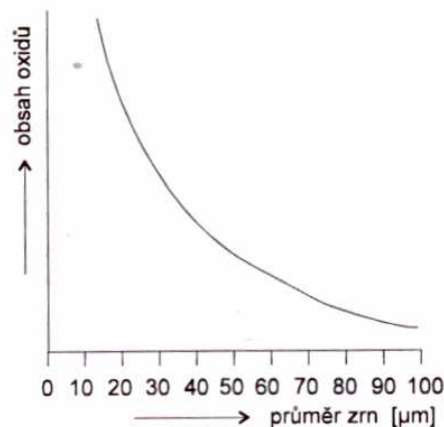
tabulka 2: Složení a dělení pájecí pasty

Velikost zrn

Z důvodů zmenšování součástek se v hromadné výrobě používají vyšší hustoty osazených součástek, menší součástky s jemnějšími rastry (0,5 mm a 0,4 mm). Z tohoto důvodu musí pasty vykazovat rovnoměrné, velmi jemné zrnění s velmi malým rozptylem průměru zrn. Při výrobě vlastních zrn se používá technologie rozprašování a odstředování v ochranném plynu. Technologií rozprašování lze docílit:

- nejjemnější velikosti zrn
- kontroly stupně oxidace na povrchu pasty
- nízké oxidace na povrchu zrn

Následující graf zobrazuje jak stoupající množství jemnějšího zrnění rapidně snižuje podíl oxidů. Pouze z tohoto důvodu je nutné dodržovat co nejnižší podíl velmi jemného zrnění (prachu), který by mohl vyvolávat vlivem svého vysokého podílu oxidů problémy se smáčením nebo generovat vznik kuliček pájky. Je nutné pečlivě dbát na klasifikaci a rozdělení zrn, protože obojí pak zásadně potiskovatelnost a pájitelnost.



tabulka 3: Podíl oxidů v závislosti na velikosti zrn

Rozdělení zrn je velmi důležitý faktor s ohledem na reologii, která určuje, jak se pasta nechá nanášet, jak se odděluje z prostorů šablony a jaký má stupeň oxidace. Obsah oxidů v pájecím prášku ovlivňuje povrchové napětí a smáčivost tekuté pájky.

Typické rozdělení velikosti zrn a toleranci, pokud jde o zrnění pod 20  $\mu\text{m}$  a nebo pokud jde o zvětšenou velikost zrn podle mezinárodně uznávaných norem, je uvedeno v následující tabulce.

Rozdělení velikosti zrn a přípustný podíl prachu podle mezinárodních norem				
Vzdálenost vývodů	Rozdělení velikosti zrn			
< 0,5 mm	1 % < 20 $\mu$ ... 50 $\mu$ < 3%			
< 0,4 mm	1 % < 20 $\mu$ ... 40 $\mu$ < 1%			
Průměr zrna	Přípustný podíl prachu dle mezinárodních norem			
	JIS Z 3284	IPC SP 819	ISO	DIN
< 22 $\mu\text{m}$	10%	-	-	-
< 20 $\mu\text{m}$	-	10%	10%	10%

tabulka 4: Rozdělení velikosti zrn

#### Tavidlo v pájecí pastě

Vlastnosti tavidla jsou z velké části shodné s vlastnostmi tavidel používaných při pájení vlnou. Přechodně snižuje povrchové napětí tekuté pájky a tím ulehčuje smáčení a tvorbu pájených spojů. Tavidlo má za úkol, stejně jako u pájení vlnou, odstranit oxidy při procesu pájení. Na rozdíl od strojního pájení se používá v metodě přetavení pouze chemická dezoxidace. Tavidlo musí chemicky odstraňovat oxidy vyskytující se na substrátu nebo na pájených ploškách, na ploše pájky nebo na přívodech součástek, aby pájka mohla se substrátem vytvořit intermetalickou vazbu. Zahřátím pájeného místa může opět dojít k oxidaci. Podíl pevných látek v pájecí pastě ovlivňuje během pájecího procesu vznik oxidů. Tavidlo velkým dílem určuje, jaká bude potiskovatelnost a pájitelnost. Složení tavidla také ovlivňuje dobu skladování, spolehlivost a podstatné chemické a elektrické vlastnosti pasty.

#### Složení tavidla:

- pryskyřice

- aktivátor
- tixotropní materiály
- rozpouštědla

Funkcí tavidla jako organické složky pájecí pasty je zajistit zpracovatelnost pájecího prášku pro tisk šablonou a sítotisk, jakožto i aktivovat plochy, jež mají být pájeny.

Funkce pryskyřice je následující: určuje těstovitou konzistenci pájecí pasty a udržuje pájecí kuličky pohromadě v suspenzi a brání jejich vysrážení. Lepkavosti pryskyřice se také využívá k udržení SMD na pájecích ploškách desky plošných spojů během pájení přetavením.

Aktivátory určují typ pájecí pasty.

Tixotropní materiály, jako je celulóza a akrylové pryskyřice, ovlivňují tlakově závislou viskozitu pájecí pasty. Pájecí pasty pro tisk přes šablonu mají větší viskozitu než pasty určené pro sítotisk. Přesnosti obrysů, vyžadované u tisku přes šablonu je možné dosáhnout pouze zajištěním vysoké viskozity.

Rozpouštědlo hraje hlavní roli při určování viskozity pájecí pasty a doby zpracování před procesem osazování. Jeho složení a procentuální podíl mají rozhodující vliv na proces tisku a stabilitu nánosu pájky po procesu tisku. Chování rozpouštědla během procesu pájení určuje sklon ke vzniku kuliček pájky.

### **1.3.2 Nanášení pájecí pasty**

Pájecí pasty se nanáší třemi způsoby:

- dávkování – dispenzerem
- tiskem přes síto – sítotiskem
- tiskem přes šablonu

#### ***1.3.2.1 Nanášení pájecí pasty dávkováním***

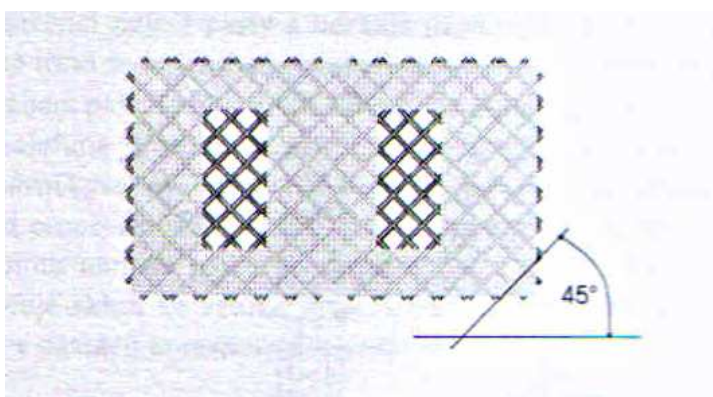
Pájecí pasta se nanáší pouze do bodů, kde je zapotřebí. Složení pájecí pasty, pokud jde o pájecí zrna a tavidlo je možné optimálně koordinovat s požadavky dávkování.

Ruční dávkování: - je vhodné pro nízké objemy pájení nebo opravy.

Strojní dávkování: - se používá jako alternativa k tisku přes síto nebo šablonu. Výhodné je při výrobě velkého množství typů desek kde se ekonomicky nevyplatí vyrábět nákladné šablony.

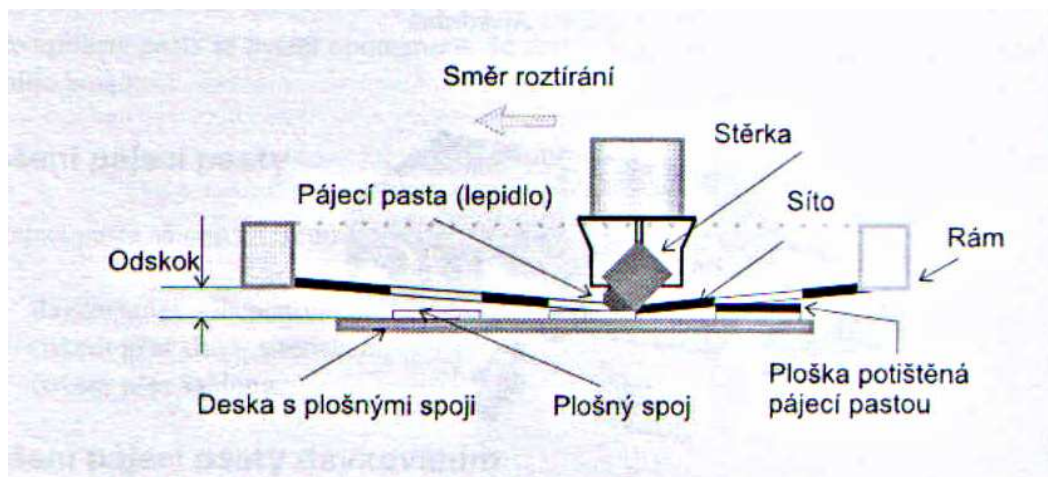
### 1.3.2.2 Tisk přes síto – sítotisk

Síto je síťka z nylonových, polyesterových nebo kovových vláken opatřená fotocitlivým materiálem. Hustota ok je v rozmezí 24 – 78 ok na 1 cm délky. Oko síťky by mělo být 2,5 – 4 krát větší než jsou největší částice pájky. Běžná velikost částic pájky bývá 40 – 70  $\mu\text{m}$ , proto se je velmi často používaná velikost oka síťky 200  $\mu\text{m}$ . Místa která mají být nanášena pájecí pastou jsou osvětlena UV světlem. Ozářený materiál je chemickým procesem odstraněn a neosvětlená vrstva je vytvrzena. V otvorech zůstávají pouze jednotlivá vlákna síťky. Síto je připevněno k pohyblivému rámu. Síťka je umístěna nad deskou plošných spojů ve výšce 0,8 – 1,0 mm a musí být v souladu s motivem na desce. Hranice tisku jemných motivů jsou rozteče 0,635 mm.



Obrázek 12: Sítotisk

Při pohybu stěrky po sítu a protlačováním pasty je síto prohýbáno. To znamená, že jakmile se stěrka vzdaluje od potištěného místa, síťka se nadzvedává. Na desce plošných spojů zůstávají plošky potištěné protlačenou pájecí pastou. Tloušťka vrstvy pájecí pasty závisí na celkové tloušťce síta, částečně také na obsahu pájky v pastě a velikosti částic. Obvykle se pohybuje v rozmezí 100 – 300  $\mu\text{m}$ .

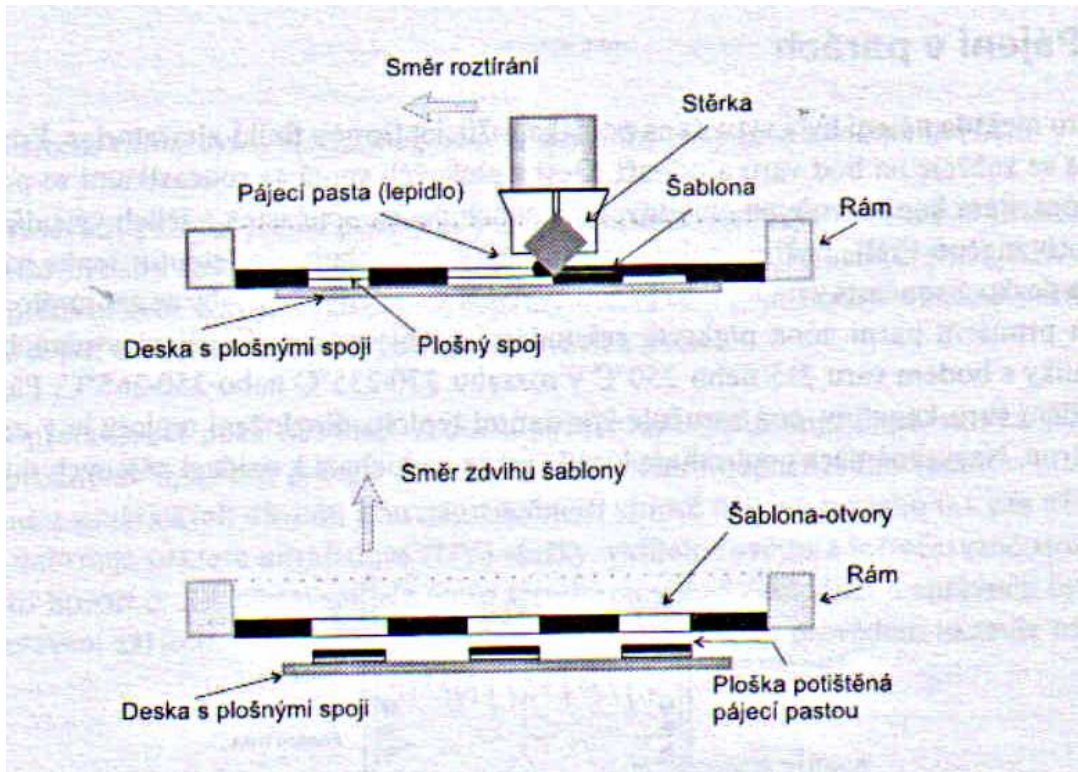


Obrázek 13: Sítotisk

### 1.3.2.3 Tisk přes šablonu

Při této metodě se vrstva pasty na jedné straně desky plošných spojů nanáší při jediném průchodu stěrky. Stěrka tlačí pájecí pastu přes kovovou šablonu, která obsahuje obrazec, jenž má být vytištěn na desku plošných spojů. Pájecí pasta je protlačována přes otvory v šabloně. Kovová šablona je přímo připevněna k upevňovacímu rámu, nebo je zalepena do rámu se sítom. Vzhledem k použitým materiálům jsou kovové šablony méně elastické než síta, nedochází k průhybům, tudíž šablona plně spočívá na desce plošných spojů. Materiálem bývá nerezová ocel, mosaz, niklová mosaz nebo měděný bronz. Tloušťka je 0,1 – 0,5 mm. Stěrka musí být vyrobena z tvrdé pryže. Měkké materiály by byly podstatně dříve opotřebené při kontaktu s ostrými rohy výřezů.

Rozměry otvoru šablony pro jemné rozteče musí být takové, aby nejméně polovina pájecích kuliček přesně pasovala do otvoru šablony. Nutný je pečlivý výběr pájecí pasty s přihlédnutím na případný obsah oxidů, protože pasta s menšími kuličkami má relativně větší povrch a na větším povrchu vzniká více oxidů.



Obrázek 14: Tisk přes šablonu

V první fázi se šablona přesně přiloží na desku plošných spojů. Potom se pasta rozetře rovnoměrným pohybem stěrky. Na konec se šablona zvedne.

V porovnání s metodou sítotisku, kde je životnost několik tisíc potisků na jedno síto, je možno pomocí metody tisku šablonou provést několik desítek tisíc potisků za předpokladu šetrného zacházení s šablonou.

#### Kovové šablony se vyrábějí:

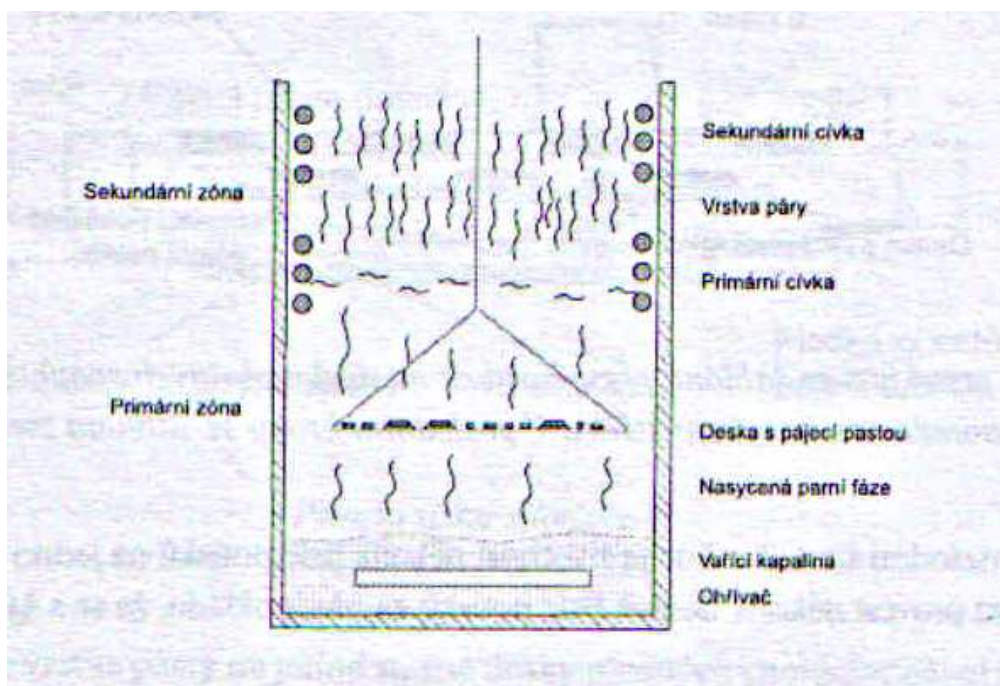
- chemickým leptáním
- řezáním laserem
- galvanickou cestou



### 1.3.3 Metody přetavení

#### 1.3.3.1 Pájení v páře

Tato metoda vznikla počátkem 70 let. Pracuje na principu zahřátí kapaliny na bod varu a potom se odpaří. Deska plošných spojů se součástkami se ponoří do zóny odpařování. Pára kondenzuje na chladných plochách desky, součástek a jejich vývodů. Kondenzace při teplotě značně vyšší než je teplota tavení pájky, způsobuje že se teplo páry přenáší a zahřívá desku a součástky na teplotu pájení čímž se vytvoří pájený spoj. K pájení v parách se používá fluórouhlíku s bodem varu 215 nebo 250°C. Pájecí teplota je určena bodem varu kapaliny, což zaručuje konstantní teplotu a rovnoměrné rozložení teploty v celém prostoru. Nasycená pára neobsahuje kyslík proto nedochází k oxidaci pájených míst.



Obrázek 15: Pájení v páře

#### 1.3.3.2 Přetavení infračerveným zářením

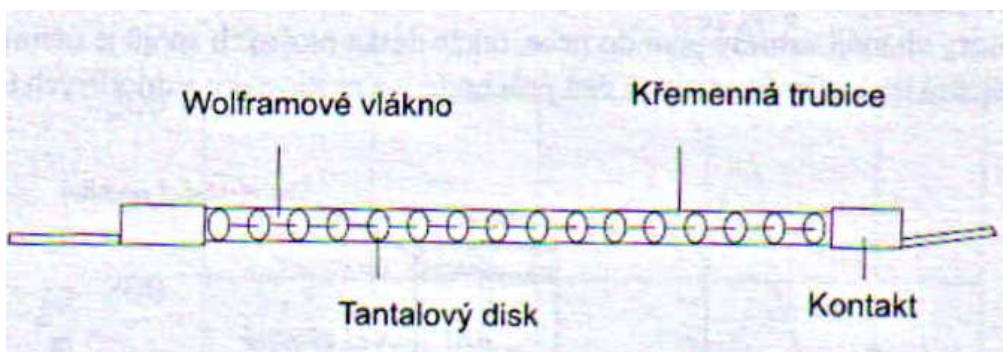
Po nanesení pájecí pasty a vložení součástek se sestava vystaví vlivu tepelné energie s cílem zahřát pájecí pastu a její okolí nad bod tavení slitiny čímž po ochlazení vznikne pájený spoj.



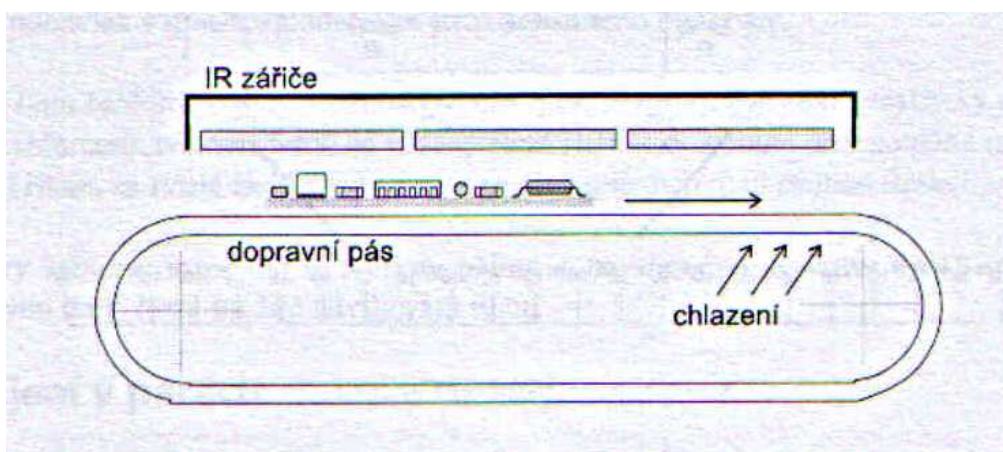
Každá látka emituje elektromagnetické záření pokud nemá teplotu absolutní nuly. Čím větší je teplota tím vyšší je vyzářená energie. Energie zářiče jenž je součástí elektromagnetického spektra nepotřebuje ke svému šíření žádné médium.

V přetavovacích pecích používaných v průmyslu je primární teplo téměř výlučně odvozeno z elektricky napájených zdrojů, jež vyzařují svou tepelnou energii. Zvyšováním elektrického příkonu tyto zdroje zvyšují svůj tepelný výkon tím je zajištěna určitá míra ovladatelnosti.

Nejužitečnější vlnové délky jsou v rozsahu 0,1 – 100  $\mu\text{m}$ . Tento rozsah zahrnuje některé složky ultrafialového záření, viditelné světlo a složky infračerveného záření.



Obrázek 16: Konstrukční provedení wolframového zářiče



Obrázek 17: Jednoduchý model přetavovací pece s infrazářičem

#### Výhody:

- jednoduchá konstrukce pece
- nízká setrvačnost mezi primárními ohřivači a obrobkem
- pásmové ovládání v značném rozsahu

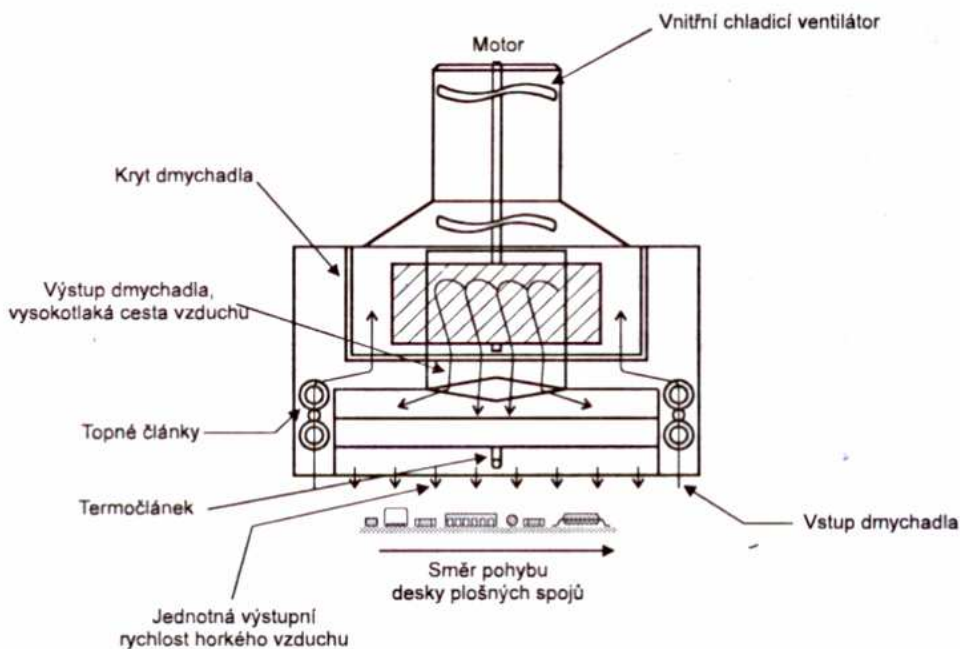
Nevýhody:

- měnící se charakteristiky pohlcování teplo součástkami
- účinek stínění

**1.3.3.3 Nucené proudění**

Nuceného proudění využívá mnoho moderních pecí jako primárního mechanismu k přenosu tepla. Tento způsob překonává některé nevýhody infrazářičů. Proto je hodně oblíben.

Primární zdroj tepla, jenž pracuje s vyšší teplotou než tepelný zářič, zvyšuje teplotu místního ovzduší a ventilátory vhánějí zahřátý vzduch do pece. Deska plošných spojů je účinně ponořena do prostředí přenášející teplo. Profil pájení je dán průchodem a nastavením jednotlivých teplotních pásem. Řízení procesu v peci s nuceným prouděním je určováno především časem. Čím déle je deska plošných spojů v zahřátém pásmu, tím těsněji se přiblíží teplotě plynu. Teplota kteréhokoliv místa sestavy v jakémkoliv okamžiku se rovná teplotě zbytku desky což je velká přednost.



Obrázek 18: Zahřívací modul n principu pájení

Výhody:

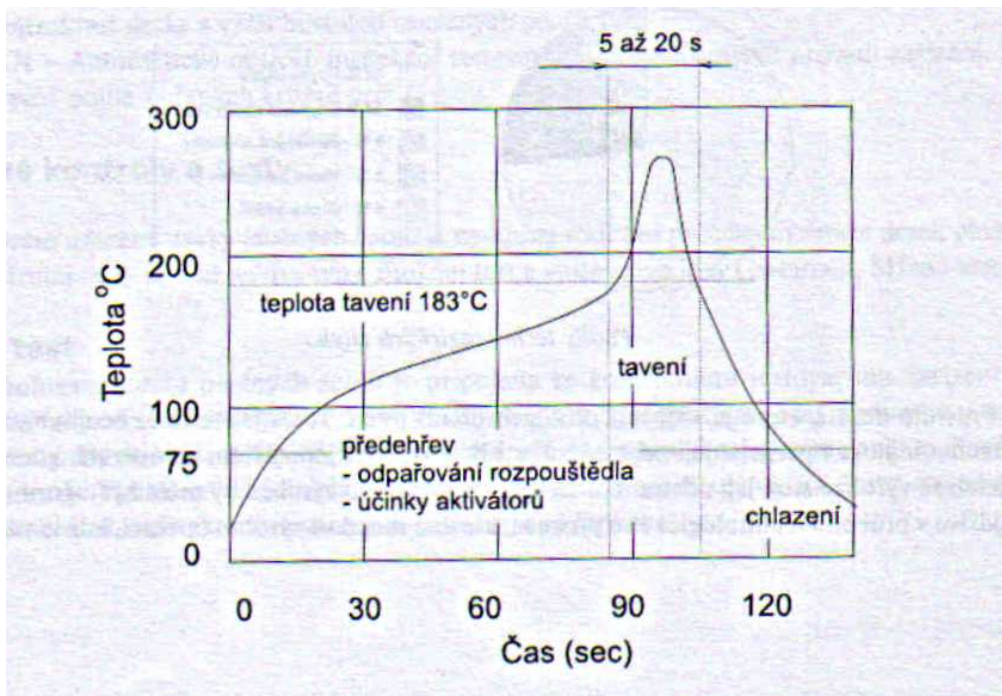
- přesné řízení teploty
- nižší náklady na zařízení
- vysoký výkon
- necitlivost k barvám
- pájení po obou stranách

#### Nevýhody:

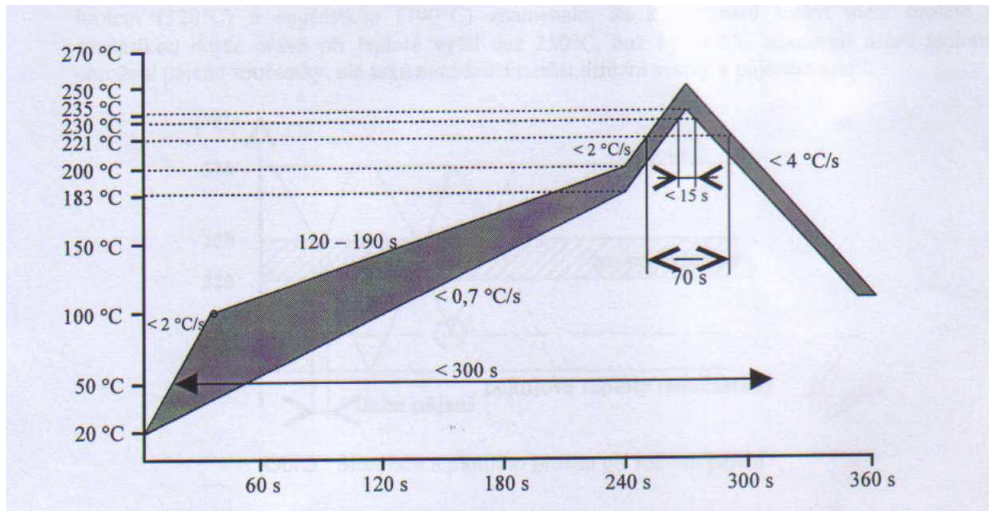
- delší doby pájení

### 1.3.4 Teplotní profil

Teplotní profil musí být vždy odzkoušen. Není možné vycházet pouze s profilu doporučeného výrobcem pájecí pasty. Různé osazené desky plošných spojů mají odlišné povrchy, velikosti povrchu, různé barevné provedení atd. Tyto činitele ovlivňují působení tepla na desku, proto je vždy nutné vytvořit na každý druh desky nový teplotní profil.



graf 1: Teplotní profil pájení přetavením infračerveným zářením nebo nucený prouděním



graf 2: Doporučený teplotní profil pro bezlovnaté slitiny



## 2 PÁJECÍ SLITINY

Pájecími slitinami, neboli pájkami rozumíme řadu kovů a slitin o nízkém bodu tání používaných pro vytváření elektrických spojů na osazených deskách plošných spojů.

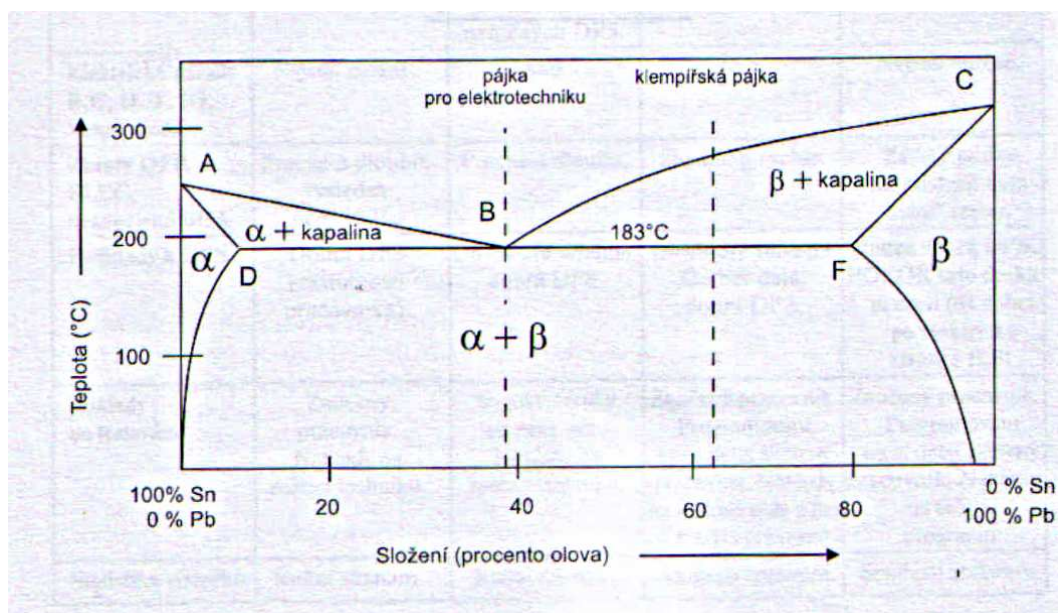
### 2.1 Slitiny cín – olovnaté

Donedávna byla v elektrotechnickém průmyslu nejrozšířenějším materiálem pro vytváření elektrických spojů na osazených deskách plošných spojů pájka Sn/Pb. Pájecí slitiny pro použití v elektronice však spadají do úzkého pásma od 60%Sn/40%Pb až po 65%Sn/35%Pb. Uvnitř tohoto rozsahu je eutektická slitina, která je definována jako 62%Sn/38%Pb a která se taví při nejnižší teplotě ze všech slitin cínu a olova a to při 183°C.

#### 2.1.1 Fázový diagram

Slitina je směs dvou nebo více kovů. Většina slitin se vyrábí v kapalné fázi a vytváří strukturu během tuhnutí. Poměr skladebných kovů a konečnou krystalickou strukturu ovlivňuje způsob jejího tuhnutí.

I když jsou dva kovy v kapalné fázi jeden ve druhém zcela rozpustné, neznamená to ještě, že musejí tuhnut tak aby vytvořily homogenní pevnou fázi.



graf 3: Fázový diagram pro slitiny cín – olovo

V případě pájky se předpokládá, že se skládá s cínu a olova. Na fázovém diagramu základní čára představuje 100% A, 0%B vlevo, 0%A, 100% B vpravo. Svislá osa vyjadřuje teplotu V našem případě A= cín (Sn) a B= olovo (Pb), kompozice jsou vyjádřeny v hmotnostních procentech.

Na fázovém diagramu pro pájku čára AB ukazuje, jak se bod tuhnutí cínu sníží z 232°C v čistém stavu na 183°C, jestliže obsahuje 38% olova. Podobně čára CB ukazuje, jak poklesne bod tuhnutí olova z 327°C v čistém stavu na 183°C ve slitině s 63% cínu. Nad čarou ABC je slitina kapalná, pod čarou ADBFC je slitina tuhá.

Přídavky třetího kovu v pájecí slitině mají původ ve snaze zlepšit pájecí vlastnosti pájky v těchto případech:

1, Přídavek Cu je historicky dán obdobím, kdy se pájelo holými měděnými hroty a měď přidaná v pájce měla za účel difúzi hrotu do pájky. Tyto slitiny se již dnes nepoužívají.

2, Přípravek Ag opět snižuje difúzi kovu do slitiny. Byl to případ kdy terminály součástek byly pokryty slitinou Ag/Pd (hybridní integrované obvody, první SMD čipy). Z hlediska roztékavosti pájka s přídavkem Ag vykazuje nepatrně lepší vlastnosti a je méně náchylná k oxidaci. Někteří výrobci dnes přidávají Ag do svých slitin kdy jeho obsah se pohybuje kolem 2%.

3, Přídavek antimonu Sb má vliv na vyšší mechanickou pevnost a odolnost pájeného spoje. Tento přínos je nepatrný, proto se ve větší míře nepoužívá.

4, Přídavek vizmutu Bi vede k matnějšímu povrchu spoje při zachování standardních vlastností slitiny, což může usnadnit vizuální kontrolu pájeného spoje. Také se používá minimálně.

### 2.1.2 Podvojně slitiny

Cín a olovo představují nejobvyklejší skupinu podvojných slitin, tj. těch které vykazují částečnou vzájemnou rozpustnost. Z tohoto důvodu existují dvě oblasti fázového diagramu (alfa, beta), které představují jednotlivé fáze krystalické struktury v důsledku horních mezí rozpustnosti pro cín a olovo a při překročení olova v cínu,

Dvě další zóny ABD a BCF představují oblasti, kdy je slitina „kašovitá“ (obsahuje jak kapalnou tak tuhou fázi). Oblast BCF : krystaly kompozice beta se budou tvořit, zatím co zbytek slitiny je ještě kapalný. Tyto krystaly budou narůstat do dendritických struktur do

té doby, než slitina úplně ztuhne. Pak se bude zrnitá struktura skládat z beta dendritických jader v alfa krystalové matici. Protože alfa krystaly vznikají prakticky okamžitě, jakmile teplota slitiny klesne pod 183°C, mají tendenci být malé. Výsledná struktura je známá jako hrubozrná (velké beta, malé alfa) a má sklon být mechanicky slabší se špatnou elektrickou vodivostí.

Eutektická pájka je jedinou slitinou cínu a olova, která je nejvhodnější pro elektrotechnický průmysl, protože přechází z kapalné fáze do pevné prakticky okamžitě (bod B v diagramu). Rovněž má nejnižší teplotu tavení a to 183°C. Výsledná krystalická struktura sestává z drobných zrn stejné velikosti alfa i beta (protože měla omezenou dobu k růstu) bez náznaku dendritických jader, která potenciálně snižují pevnost. Tato jemnozrná struktura udržuje vysoký stupeň vodivosti.

### 2.1.3 Čistota pájecí slitiny

Přítomnost nečistot v pájecí lázni, má významný vliv na tvorbu konečného spoje, většinu nepříznivý. Tyto nečistoty se do pájecí slitiny dostávají zejména z vlastního výrobního procesu, kdy se ve slitině rozpouští pokovení součástek, jejich vývodů či pokovení desek plošných spojů. Zejména při pájení vlnou se pak tyto nečistoty hromadí v pájecí lázni a mají vliv na kvalitu procesu. Nejkritičtější je v současné době znečištění zlatem, které se do slitiny dostává z pokovení desek plošnými spoji či některých součástek. Zlato obsažené v pájeném spoji nesmí překročit 1,4% objemu. V dobách pájení desek s plošnými spoji s vodiči s čisté mědi bez povrchové úpravy, byli aktuální také znečištění rozpuštěnou mědí s těchto ploch. Dnes se již pájí na povrchově upravených deskách s plošnými spoji čímž je tohle nebezpečí eliminováno.

## 2.2 Slitiny bezolovnaté

Kritéria bezolovnaté pájky

- Netoxické
- Dostupné a cenově přiměřené
- Úzký teplotní rozsah plasticity
- Přijatelná smáčení
- Materiálově vyrobitelné

- Vytvoření spolehlivých spojů

Jiným i slovy pájka musí být na trhu za cenu odpovídající požadavkům konkrétního typu výrobku, její aplikace musí zajišťovat technologickou slučitelnost s příslušným typem výrobního procesu a parametry pájených spojů musí splňovat požadavky jakosti finálního výrobku v nejširším slova smyslu.

### 2.2.1 Použitelné bezolovnaté slitiny

Bylo testováno mnoho pájek které by měli nahradit Sn/Pb. Existuje mnoho slitin, každá s různými výhodami a nevýhodami. Velká část byla postupně vyloučena. Následující slitiny jsou považovány za vhodné náhrady eutektického systému Sn/Pb. Mnoho systémů je založeno na přidavku malého množství třetího nebo čtvrtého prvku s cílem snížit bod tavení, nebo zvýšit smáčení a spolehlivost.

1. *Sn96,5 /Ag3,5 (Sn96/Ag4)*
2. *Sn99,3/Cu0,7 (Sn99/Cu).*
3. *Sn/Ag/Cu*
4. *Sn/Ag/Bi/X*
5. *Sn/Sb*
6. *Sn/Zn/X*
7. *Sn/Bi<sup>5</sup>*

---

<sup>5</sup> Podrobnější informace viz příložená rozšiřující verze bakalářské práce



Vlastnost	Slitina	
	Sn/Ag3,8/Cu0,7	Sn62/Pb
Solidus, °C	217	181
Likvidus, °C	217	183
Hustota, g/cm	7,5	8,4
Úhel smáčení na Cu	43	12
Úhel smáčení na Ag	24	13
Úhel smáčení na Cu <sub>5</sub> Sn <sub>5</sub>	18	17
Povrchové napětí při 260°C, mN/m	548	481

tabulka 5: Fyzikální vlastnosti pájky u slitin SAC

### 2.2.2 Shrnutí

Ačkoliv dosud nebyla uvedena žádná zázračná náhrada za eutektickou pájku Sn/Pb, žhavým kandidátem je slitina cín/stříbro/měď (Sn95,5/Ag4/Cu0,5). Tato kompozice, která se taví při 217-219°C, umožňuje účinné přetavení, aniž by citlivé součástky byly ohroženy teplem. Kromě toho nabízí významné přednosti související s procesem: je plně slučitelná se stávajícími technologiemi sítotisku, vsazování a přetavení, vytváří vysoce spolehlivé pájené spoje, má vynikající schopnost smáčení a dobu lepidlosti, není kryta patenty, a nereaguje s olovem které může být přítomno v součástkách a na deskách plošných spojů.

Použití pájecí pasty na bázi této slitiny ve výrobě proběhlo úspěšně při 225°C, aniž by došlo k poškození aktivních prvků. Studie sestav přetavených v těchto výrobních procesech naznačily, že pasta SAC funguje přinejmenším stejně tak dobře, a v některých případech lépe, než pájka Sn/Pb.

Bylo zjištěno, že tisknutelnost, doba lepidlosti a životnost slitiny cín/stříbro/měď je stejná jako u kompozic na bázi olova. I když součástky a podložky používané při práci, obsahovaly olovo, tato slitina nevytvářela křehkou intermetalickou fázi, jež je charakteristická u některých jiných bezolovnatých slitin. Při testech prováděných na konci

výrobní fáze nebyly zjištěny žádné výrobní vady, jež by bylo možno přičíst na vrub bezolovnaté pájecí pastě.

Za účelem stanovení dlouhodobé stability pájeného spoje byly provedeny rozsáhlé série testů, pokrývající kinetiku rozpuštěné mědi, izotermické stárnutí a deformaci tečením. Výsledky těchto testů naznačily, že tato slitina dává pájené spoje, jež vydrží přinejmenším stejně dlouho, a někdy déle, než eutektické pájené spoje.

Ať se bezolovnatá pájecí pasta používá na povrchově montovaných sestavách nebo hybridních obvodech, zajišťuje zvýšenou odolnost proti únavě, nepřítomnost deformace při tečení a snášenlivost k vyšším provozním teplotám, což jsou vlastnosti nezbytné pro náročné aplikace.

Další předností této slitiny je její dostupnost. Protože není patentována, může ji dodávat mnoho výrobců past. Nepatentované výrobky nevyžadují žádné licenční poplatky, měla by tato slitina být i cenově efektivnější. Pro výrobce elektroniky, usilujícího o náhradu Sn/Pb pájky bezolovnatým výrobkem patří dostupnost a cena mezi prvotní kritéria. Systémy Sn/Ag/Cu jsou méně náchylné k znečištění olovem, než systémy obsahující Bi.

### 2.2.3 Čistota pájecí slitiny

Největším problémem kontaminace bezolovnatých pájecích slitin je jejich znečištění mědí a olovem. Objevují se i problémy znečištění železem. Měď se do pájecích slitin opět dostává nejvíce z desek s plošnými spoji, olovo z pokovených součástek a desek s plošnými spoji (pokud se v procesu toto pokovení vyskytuje) a železo z materiálů pájecích van. Dnes se ji téměř nevyskytují desky s plošnými spoji s povrchem vodičů z čisté mědi. Standardně se povrch měděných vodičů upravuje pro zlepšení pájitelnosti a navíc je velká plocha kryta pájecí maskou, takže ve styku se slitinou jsou pouze pájené body.

Nebezpečí kontaminace mědí je kritické zejména při použití pájecích slitin Sn/Cu, kde zvýšení koncentrace mědi prudce zvyšuje teplotu likvidu slitiny. Například zvýšení koncentrace mědi na 2% vede ke zvýšení likvidu na cca 300°C. U slitin Sn/Ag vede kontaminace mědí k neřízeným změnám vlastností slitiny. Slitiny SAC jsou na kontaminaci mědí méně náchylné, protože již malé procento mědi obsahují a to zabraňuje

další difúzi. Nejlepší způsob jak zabránit kontaminaci mědí, je správná úprava desek s plošnými spoji, která zabráni difúzi mědi do pájecí slitiny.

Kontaminace olovem je kritická, jak již bylo uvedeno, zejména pro slitiny, které obsahují vizmut. Zde je nutné důsledně sledovat součástky a desky s plošnými spoji vstupující do procesu. U těchto bezolovnatých pájek působí kontaminace olovem tak, že klesne teplota solidu slitiny. To může vést při velkých znečištěních k tomu, že se vytváří ternární eutektické fáze, jejichž bod tání leží pod hodnotou pro původní slitinu. Následkem je snížení spolehlivosti pájeného spoje a za určitých okolností může dojít k tomu, že pájené místo bude již během tuhnutí křehké.

Kontaminace pájecí slitiny železem vede k tvorbě intermetalické slitiny Fe/Sn<sub>2</sub>, která se vytváří ve formě jehliček zejména v klidných oblastech lázně a výrazně ovlivňuje kvalitu pájení. Proto je třeba se vyhnout při konstrukci nových pájecích vln, zařízení pro selektivní pájení cínovadel materiálům na bázi železa (titanové slitiny) nebo je opatřit vhodnou povrchovou úpravou. Proto může být nebezpečné použití bezolovnatých pájek v zařízeních která jsou konstruována pro pájení olovnatými pájkami.

#### 2.2.4 Mechanické vlastnosti bezolovnatých slitin

Mechanické vlastnosti nových slitin budou zajímat zejména výrobce, jejichž produkce je určena do prostředí s otřesy a rázy.

Tabulka ukazuje informativní srovnání v základním parametru – mez pevnosti v tahu.

Sn/Pb	31
Sn/Ag/Cu	48
Sn/Ag	58
Sn/Cu	32
Sn91,7/Ag3,5/Bi4,8	82
Sn95,5/Ag3,5/Bi1	43

tabulka 6: Mez pevnosti v tahu MPa při 20°C

### 3 PROBLEMATIKA BEZOLOVNATÉHO PÁJENÍ

Pájecí technika pracující s bezolovnatou pájkou se bude i nadále vyvíjet. Nicméně, je nepravděpodobné, že každé pájedlo eliminuje všechny problémy spojené s bezolovnatým pájením. Proto bude velmi důležité pro operátory zcela porozumět vlastnostem pájecích slitin před tím, než budou užity k pájení. Pokud je bezolovnatá pájka užívána pro pájení stejným způsobem jako pájka Sn/Pb, mohou se vyskytnout určité problémy, pájedlo se stane nepoužitelným výsledkem bude vadné pájení. Spolehlivých pájených spojů se dosáhne, pokud uživatel pochopí vlastnosti bezolovnatých pájek, bude přesně dodržovat pravidla pájení a správnou údržbu technologického zařízení. Zde bude záležet i na vedoucích pracovnících, kteří musí zajistit operátorům příslušné informace a patřičné školení k provozování pájení bezolovnatými pájkami.

Je jasné, že Pb byl prvek, který dával pájecí slitině jeho velmi kvalitní vlastnosti, které není možné stoprocentně nahradit jiným prvkem. Zkrátka neexistuje žádný alternativní kov, který by zajistil stejné podmínky jako olovo s ohledem na takové vlastnosti jako pájitelnost (schopnost se rozprostřít), viskozita, tekutost, ochrana před oxidací ( při roztavení), ohebnost (vlastní pájky) a v neposlední řadě také cena.

Pájení s bezolovnatou pájkou nikdy nebude stejné jako pájení olovnatou pájkou.

#### 3.1 Pájení vlnou

##### 3.1.1 Základní odlišnosti při bezolovnatém pájení vlnou

Pájení bezolovnatými pájkami na vlně vyžaduje vyšší teploty pájení. Toto se týká slitin Sn/Ag, Sn/Cu a Sn/Ag/X, které jsou považovány v současnosti za nejvhodnější alternativu. Teplota lázně musí být přesně stavitelná a říditelná v úzkém rozsahu, aby vyšší teplota nepoškodila součástky a desku plošného spoje. Proto se požaduje, aby pájecí vlny pracovaly s vyšší přesností, než tomu bylo dosud. S novými slitinami a tavidly se mění také požadavky na předhřev a chlazení. Stoupá také význam použití ochranné atmosféry dusíkem. Při vyšší teplotě pájecí slitiny se zvyšuje rychlost její oxidace a dusík pak redukuje tvorbu oxidu v pájeném spoji. Tím výrazně podporuje nejen lepší smáčivost, ale v konečném provedení i vyšší jakost samotného spoje. Jelikož spoje vytvářené užitím

bezolovnatých pájek jsou matnější, než spoje vytvářené pájkami Sn/Pb, lze v ochranné atmosféře částečně potlačit i tento vzhledový jev. Protože dusík a lepší koeficienty přenosu tepla než vzduch, mohou být i teploty procesu nižší. Tím se zvětší i teplotní procesní okno a množství závad se sníží.

Výběr slitiny bude primární volbou, která ovlivní jakost pájeného spoje, jeho spolehlivost a výtěžnost ve výrobě. Většina montážních závodů bere slitinu SAC jako nejvhodnější náhradu. Tato slitina má rozsah tavení 217 až 220°C, tradiční pájka Sn/Pb má bod tavení 183°C. Někteří uživatelé volí slitiny Sn/Cu, protože vzhledem k chybějícímu stříbru je jejich cena podstatně nižší než u formulací SAC. Tato slitina se taví při 227°C, avšak testy smáčecí rovnováhy, prováděné s různými povrchy, jako je smáčení stříbra, zlata-niklu a holé mědi s organickými povrchy indikují snížené smáčecí síly této slitiny. Ve výrobě to bude znamenat delší dobu styku s vlnou, aby se vyplnily průchozí otvory. Vyšší teploty tavení budou rovněž vyžadovat poněkud vyšší teploty lázně. Slitiny SAC je možno zpracovávat při 255 až 260°C. Sn/Cu bude vyžadovat 260 až 270°C.

Volba tavidla bude druhým kritickým krokem při pájení vlnou bez olova. Bude nutné optimalizovat aktivitu a tepelnou stabilitu tavidla, aby výskyt vad byl na velmi nízké úrovni při současném přiměřeném plnění otvorů. Tavidla původně určená pro systémy Sn/Pb nemusí vždy zajišťovat adekvátní plnění otvorů ve spojení s bezolovnatou pájkou bez zvýšení objemu nanášeného tavidla nebo prodloužení kontaktní doby, což ovlivní výrobní výkon a může vést k zavedení operace čištění po pájení.

Nové specifické formulace kapalných tavidel nevyžadujících čištění pro bezolovnatou technologii vedla ke zdokonalení aktivátorů, jež jsou tepelně stabilní při vyšších teplotách přehřevu a lázně. Snášejí poněkud delší dobu styku s pájkou a jsou aktivní ještě po vynoření desek z vlny, takže snižují tvorbu můstků a podporují lepší plnění otvorů. Tato vlastnost tavidla se také nazývá trvalá aktivita. Dalším trendem v pájení vlnou je použití tavidel bez těkavých organických látek (VOC) ve spojení s bezolovnatou pájkou. Zde se nabízí možnost úplně „zelené“ pájecí operace. Tavidla bez VOC se vyznačují vyšším obsahem pevných látek v rozsahu 4% a více. Pro tato tavidla na bázi vody jsou ideální postřikovací aplikátory a konvekční přehřevy.

Povrchová úprava desky a součástek je dalším výběrovým parametrem, jenž může ovlivnit spolehlivost a výrobní výkon. Nejlepší výsledky pájení se dosahují pomocí povrchové

úpravy desek matným cínem. Součástky, jejichž povrchová úprava obsahuje olovo nebo vizmut, mohou při pájení bezolovnatou slitinou způsobit zvedání kužele

### 3.1.2 Změny v konstrukci pájecích vln

Zařízení pro pájení vlnou musí být slučitelné s bezolovnatou technologií. V důsledku vyššího obsahu cínu v bezolovnatých slitinách je hlavním problémem louhování železa z materiálů v pájecí vaně, protože pájka bez olova je agresivnější, než tradiční slitina Sn/Pb. Slitiny bez olova nejen poškozují díly ve vaně, nýbrž v důsledku zvýšené difúzní reakce vyššího obsahu cínu v pájce způsobují rovněž obohacování pájecí lázně železem, zvláště v klidných oblastech trysky. To si vyžádá u některých strojů náhradu pájecí vany, oběžného kola a potrubí materiály nebo povlaky, které brání rozpouštění.

Materiály slučitelné s vyšším obsahem cínu jsou:

- nitridovaná ocel
- titan
- litina
- keramické nebo kompozitní povlaky

Z hlediska bezpečnosti, která musí být na prvním místě, patří závada pájecí nádoby nebo vany k nejvážnějším nebezpečím, převyšujícím prasknutí vnitřních částí, používaných k čerpání a vytváření vlny. Funkční porucha materiálu nádrže může představovat ohrožení bezpečnosti a způsobit zranění. Porucha jiných dílů může vést k prostoji nebo ztrátě výroby, avšak obecně nepředstavuje situaci ohrožující bezpečnost.

Zařízení vyrobená před zavedením bezolovnatých pájek obvykle používala jako základní materiál nádrže svařovanou nerez ocel řady 300. Někteří výrobci upravovali nerez ocel nitridačním procesem v solné lázni, jiní používali na výrobu dílů nádrže litinu. Většina vnitřních částí trysky a čerpadla byla vyrobena ze slitin nerez oceli řady 300, a tyto materiály prokázali vynikající životnost při používání pájek Sn/Pb. To bohužel neplatí při použití bezolovnatých slitin s vysokým obsahem cínu. Při přechodu na bezolovnaté pájky mohou některé vlny vyžadovat jen velmi drobné změny materiálů nebo součástí, zatím co jiné mohou vyžadovat výměnu celé pájecí jednotky ve stroji.

Řešení pomáhající zabránit degradaci a korozi jsou různá. Některé oblíbené materiály pro vnitřní trysky a součásti potrubí jsou:

- celá konstrukce z titanu
- nitridovaná ocel
- nerez ocel s keramickým nebo kompozitním povlakem (Melonite, teflon)

Pro nádrže a vany s pájkou jsou známé tyto alternativy:

- šedá litina
- šedá litina s keramickým povlakem
- nerez ocel s keramickým nebo kompozitním povlakem
- nitridovaná nerez ocel

S novými požadavky na plnění prokovených otvorů se objevily i nové konstrukce trysek dvojitého či vícenásobného vln, které zajišťují větší turbulenci na prvních vlnách a říditelný úhel odtrhu a tvar laminární vlny. Tím je eliminován požadavek většího úhlu dopravníku pro bezolovnaté slitiny.

S nástupem bezolovnaté technologie se dostává do popředí také význam energeticky méně náročných vln, které mají menší náplň vany, a tím i nižší náklady na provoz. To je zejména zajímavé pro firmy, které nepracují v kontinuálním režimu a pájení na vlně provozují v cyklech. Srovnáním energetické náročnosti mezi vlnou s náplní 200 kg a 40 kg lze jednoduchým výpočtem dospět k velmi podstatným rozdílům, jen za energii určenou k náběhu na potřebnou teplotu náplně. Také energie potřebná na udržování teploty lázně na dané teplotě je nižší u vlny s menším obsahem pájecí slitiny. Zde je jedna z cest jak eliminovat vyšší výrobní náklady spojené s přechodem na bezolovnatou technologii.

### **3.1.3 Teplotní profil při pájení**

Ideální a univerzální teplotní profil pro pájení vlnou není možné stanovit ani pro pájky olovnaté ani pro bezolovnaté. Volba teplotního profilu, tj. doba a průběh teploty předehřevu, vlastního pájení a následujícího ochlazení desky, je vždy odvislá od následujících faktorů:

1, Pájecí slitina



- 2, Tavidlo a jeho způsob nanesení
- 3, Použitý typ vlny
- 4, Pájená sestava

I v případě pájení bezolovnatými pájkami platí tyto zásady:

- 1, Teplotu nádrže je nutné udržovat nad eutektickou hodnotou pájky o 30-70°C vyšší.
- 2, Přesnost regulace teploty pájecí lázně  $\pm 2^\circ\text{C}$ .
- 3, Předehřev musí zajistit zasušení tavidla a dostatečné předehřátí pájené sestavy, aby se snížil teplotní ráz při dotyku s vlnou roztavené pájky a zajistilo se požadované plnění otvorů v oboustranných deskách.
- 4, Tavidlo nesmí být při teplotě předehřevu degradované.
- 5, Rychlost, sklon dopravníku a čas vlastního pájení pro danou sestavu optimalizovat na základě požadavků na kvalitu pájeného spoje a přípustného teplotního namáhání pájené sestavy.

Jedním z nejobtížnějších úkolů při bezolovnatém pájení je stanovit optimální teplotní profil. Problémy jsou hlavně na úrovni součástek, jež jsou specifikovány pro maximální teplotu 260°C. Abychom se vyhnuli jakýmkoliv rizikům vlny, neměla by teplota vlny překročit 260°C.

Vytvořením předehřevu, jenž nepoškozuje součástky, je proces, který vyžaduje časově náročná měření a výzkum. Krok za krokem je třeba vytvořit optimální profil pro každý výrobek. Protože teplota předehřívání výrazně ovlivňuje vzlínání pájky v průchozích otvorech a krystalickou strukturu spoje.

Tabulka ukazuje typické parametry různých slitin pro pájení vlnou na standardních dvojitých vlnách.

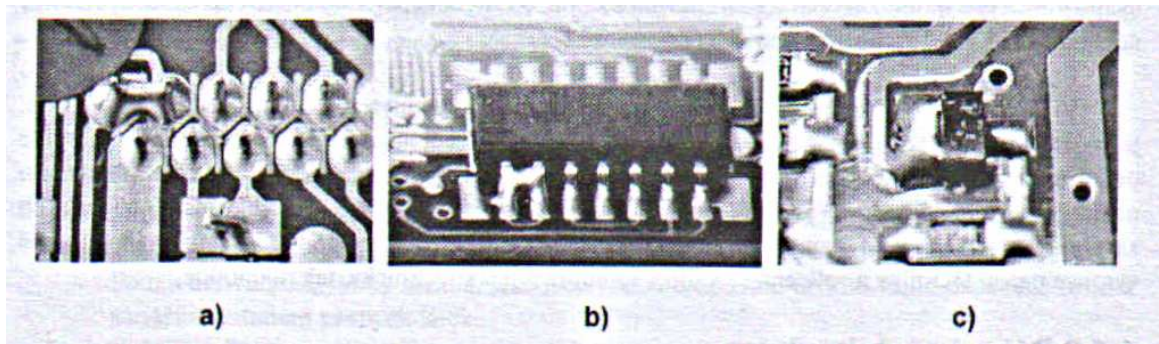
3.1.4 Parametr	3.1.4.1 Slitiny Sn/Pb	3.1.4.2 Slitiny Bi	Slitiny Sn/Ag/Cu,Sn/Cu
Bod tavení	183°C	138°C	217-230°C
Tavidlo	Nízký obsah pevných látek nebo bez čištění.	Nízký obsah pevných látek nebo bez čištění, speciální složení, např. kyselina benzol sulfonová	Nízký obsah pevných látek nebo bez čištění s vyšším obsahem pryskyřice.
Rychlost dopravníku	90-120cm/min.	90 cm/min.	60-90 cm/min.
Úhel dopravníku	7°	7°	4-10° podle konkrétní pájecí trysky
Gradient přehřevu	2°C/s	2°C/s	2°C/s
Teplota desky před vstupem do pájky	110°C	110°C	Teplota pájky* mínus 120°C(tj. 150-160°C)
Teplota pájky*	250°C	200°C ± 20°C	Bod tavení + 50°C (tj. 260-285°C)
Doba pobytu v pájce	3-4 s	3-4 s	4 s
Chlazení	cca 3°C/s	cca 3°C/s	cca 3°C/s
Dusík	Redukce strusky. Omezení požadavků na údržbu.	Lepší smáčení. Redukce strusky. Omezení požadavků na údržbu.	Lepší smáčení. Redukce strusky. Omezení požadavků na údržbu.

\*Teplota pájky v pájecí vaně

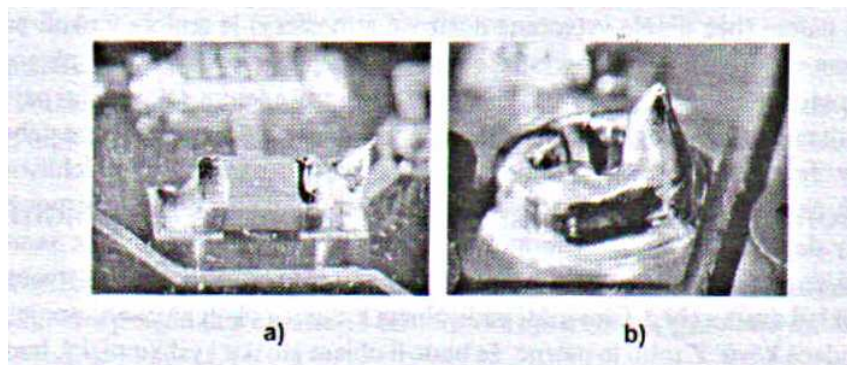
tabulka 7: Parametry různých slitin

### 3.1.5 Chyby při bezolovnatém pájení vlnou

Hlavním problémem pájení vlnou bez olova je potenciální nárůst vad pájení. Výskyt těchto vad stoupá ve špatně optimalizovaném bezolovnatém procesu: nesmáčení, nedostatek pájky, odsmáčení, rampouchy, studené pájené spoje, zrnité spoje, bubliny, kuličky pájky, zvedání kužele pájky. Nejběžnější vady jsou: nedostatek pájky, vynechané spoje, nedostatečné plnění otvorů a zrnité spoje. Tyto vady mají různé příčiny, avšak u bezolovnatých slitin a při jejich sníženém smáčecím potenciálu spojeném s vyššími teplotami lázně bude výběr tavidla podstatný pro omezení jejich výskytu.

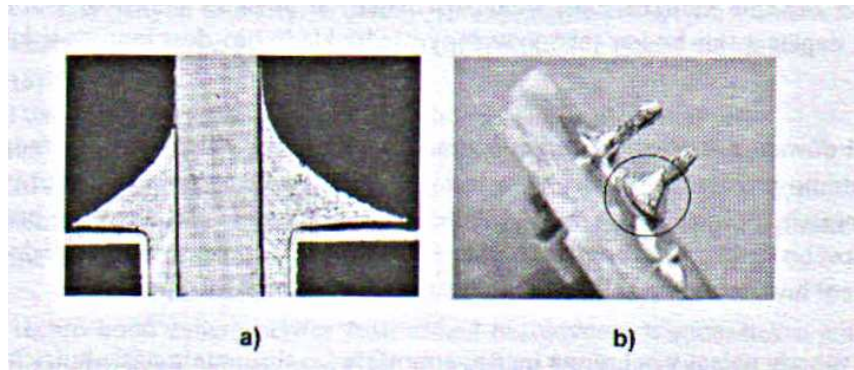


můstky

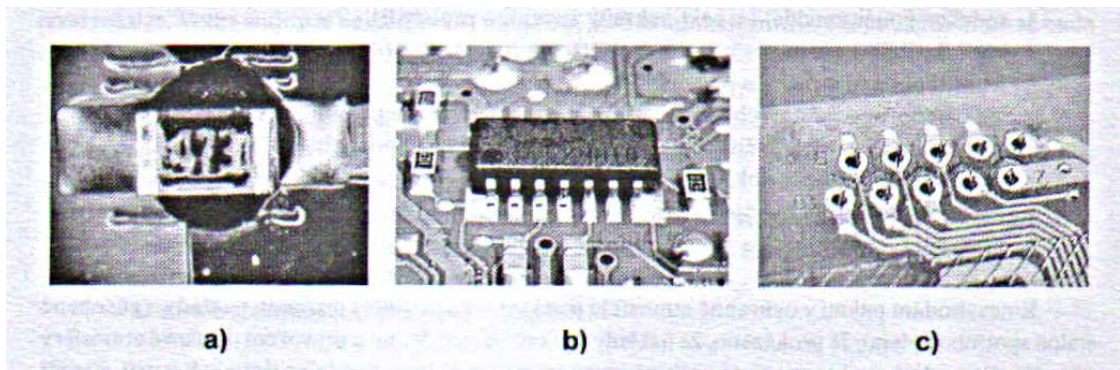


krápníky

Obrázek 19: Příklady vad pájených spojů



zvedání spojů



nezapájené vývody

Obrázek 20: Příklady vad pájených spojů

### 3.1.6 Optimalizace pájení vlnou pro bezolovnatou technologii

Proces optimalizace a kroky nutné k dosažení spolehlivých bezolovnatých spojů v průchozích otvorech:

- Zařídit slučitelnost zařízení s bezolovnatou technologií.
- Určení bezolovnatých součástek a desek
- Volba bezolovnaté pájky, SAC nebo Sn/Cu popřípadě jiné slučitelné slitiny.
- Výběr tavidla
- Určení parametrů pro dosažení maximálního smáčení a plnění otvorů.
- Nastavení bezolovnaté vlny, definování procesních a statistických limitů.
- Zajištění oddělení bezolovnatých materiálů od materiálů obsahujících olovo.
- Proškolení veškerého personálu, podílejících se na pájení vlnou, o novém procesu a kritériích přijatelné jakosti.

Příprava zařízení pro bezolovnatou technologii zahrnuje:

- Revizi použitých materiálů a dílů v pájecí vaně.
- Prověрку dopravníku a pájecích rámců zda vydrží vyšší pájecí teploty a kompenzují větší roztažnost desek ( neopomenout prověřit tepelnou odolnost mazacích tuků ,jsou-li používány)
- Kontrolu vhodnosti použitého fluxeru
- Kontrolu schopnosti přehřevu a chlazení.

## **3.2 Pájení přetavením**

Tato kapitola se týká zejména technologie s pájecími pastami typu Sn/Ag/Cu, Sn/Ag, Sn/Cu, které mají vyšší teploty tavení, než klasické Sn/Pb slitiny. Právě u těchto bezolovnatých slitin, které se považují za standardní náhradu Sn/Pb slitin, bude proces přetavení technicky náročnější, než u bezolovnatých slitin s teplotou tavení nižší než Sn/Pb.

### **3.2.1 Tisk bezolovnatých past**

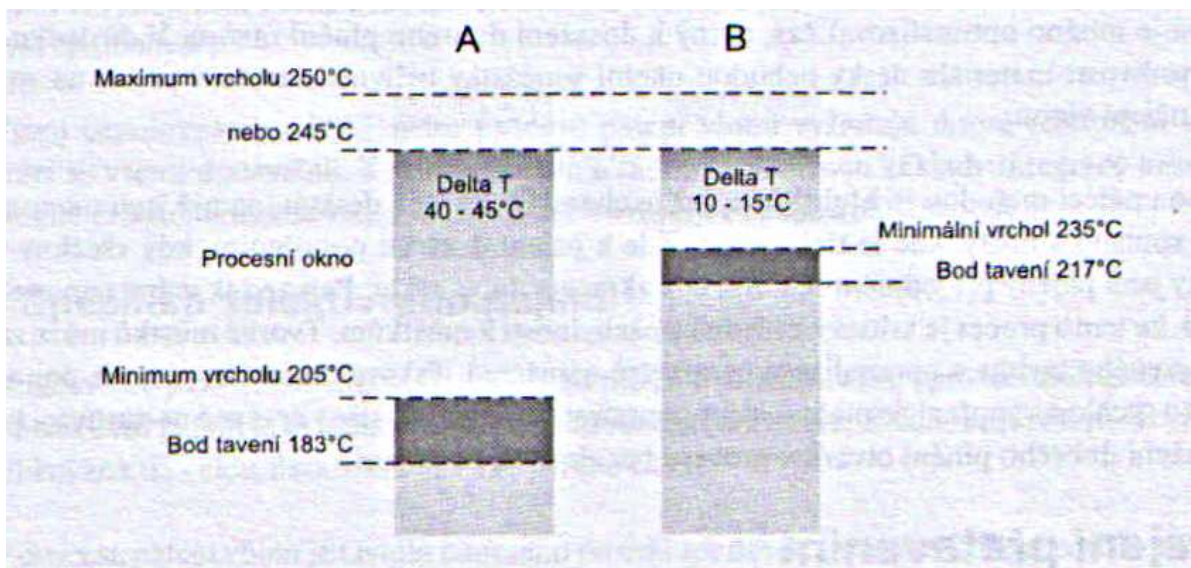
Bezolovnatá pasta se na první pohled liší od Sn/Pb pasty jen velmi málo. Vzhledem k podílu stříbra a nepřítomnosti olova se jeví nepatrně světlejší. Aby byl nanesen stejný objem kovu na plošku, má bezolovnatá pasta, vzhledem k nižší hustotě vlastní slitiny, nepatrně odlišný poměr pevné fáze a tavidla. To může částečně ovlivnit změnu chování pasty v šabloně, což lze korigovat úpravou parametrů tisku. Podle požadované viskozity se pohybuje podíl kovové části kolem 89% objemových, zatím co dříve to bylo kolem 92%. Vyšší podíl tavidla působí příznivě na zlepšení pájitelnosti, ale v některých případech může být důvodem k zavedení operace čištění. Průměry kuliček slitiny zůstávají totožné a tím pádem i rozdělení past podle průměrů kuliček zůstává zachováno. Tiskové vlastnosti jsou pak v podstatě srovnatelné a v oblasti sítotisku nejsou indikovány dramatické změny vyžadující nutně změnu technologického vybavení.

### **3.2.2 Tepelné zpracování bezolovnatých pájek**

Proces přetavení bezolovnaté pájky probíhá v daleko užším rozsahu teplot, než je tomu u klasických olovnatých pájek. Eutektické pájky Sn/Pb mají bod tavení 183°C a plně



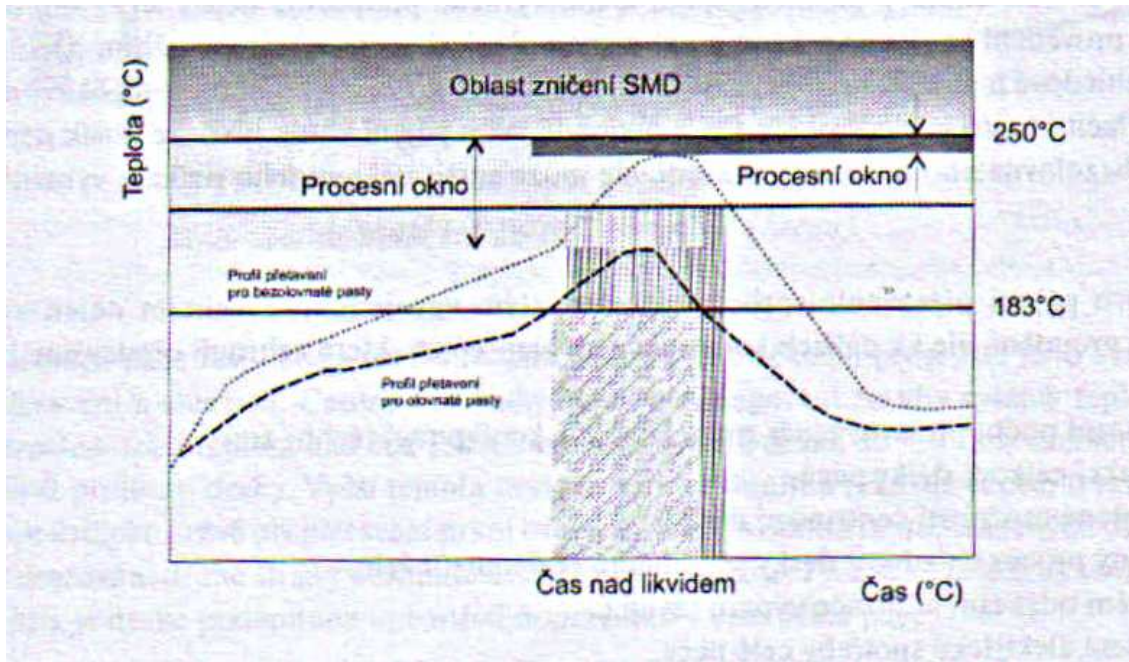
tekutého stavu dosahují v teplotním rozmezí 205-215°C. Maximální teplota substrátu desek s plošnými spoji se v tomto případě pohybuje v teplotním rozmezí 240-250°C. Teplotní proces tedy probíhá v teplotním rozsahu (oblast shody)  $DT=40-45^\circ\text{C}$ . Avšak bod tavení většiny bezolovnatých pájek se pohybuje v rozsahu teplot 215-220°C a teplota plně tekutého stavu je dosahována v rozmezí 225-235°C. Jelikož maximální možná teplota desek s plošnými spoji zůstává stejná, zúží se tedy teplotní rozsah průběhu procesu na  $DT=10-15^\circ\text{C}$ . Tento užší rozsah teplot vyžaduje, aby pec pro přetavení fungovala s vyšší úrovní schopnosti reprodukce, tedy s přesným dávkováním energie.



Obrázek 21: Procesní okno

Obecný rozdíl mezi klasickým a bezolovnatým pájecím profilem pro přetavení ukazuje následující obrázek. Z něho vyplývají následující rozdíly:

- vyšší teploty předehřevu
- vyšší teplota potřebná pro přetavení
- vyšší gradienty teploty při náběhu teploty a při chlazení.



graf 4: Rozdílný profil pro Sn/Pb a Pb-free pasty

Je tedy zřejmé, že pro dosažení správného přetavovacího profilu pro bezolovnaté slitiny jsou kladeny vyšší nároky jak na součástky a desky s plošnými spoji, tak na vlastní přetavovací pec. Tepelná odolnost součástek a desek s plošnými spoji je limitujícím faktorem, který nelze za žádných okolností překročit.

Výsledný vzhled spoje a jeho krystalická struktura závisí na procesu chladnutí. Rychlé ochlazování způsobuje jednak hrubší strukturu spoje, jednak podporuje tvorbu dutin a trhlin ve spoji a nepříznivě působí na součástky i desku. Pomalé ochlazování prodlužuje tepelné namáhání komponentů a hlavně prodlužuje výrobní proces.

Důležité je také dodržet čas nad likvidem pájky. Kratší časy vedou k nedostatečné mezikrystalické vrstvě. Delší samozřejmě více namáhají sestavu.

### 3.2.3 Přetavovací pece pro bezolovnaté přetavení

V případě přetavovacích pecí a zařízení pro vyšší procesní teploty se předpokládá, že bude zapotřebí pec s vyšší teplotou. To však není vždy pravda. Důležitější je účinnost stroje při přenosu energie na sestavu. Hlavním problémem pece je tedy obdobně jako u ručního pájení účinný přenos tepla do pájeného spoje. Proto je nutné, aby i pece pro pájení přetavením fungovaly s mnohem vyšší přesností a vyšší rezervou výkonu pro rychlejší



doregulování. Vyšší instalovaný výkon pece tedy neznamená automaticky vyšší spotřebu, ale možnost rychlejší reakce na potřeby regulačního systému teploty. Proto je výhodnější požití pece s urychleným prouděním, kde lze snadněji kontrolovat teplotu i při vyšších hodnotách. Ukazuje se zatím, že pece s infračervenými zářiči jsou pro bezolovnatou technologii méně vhodné a hůře přizpůsobivé. Jejich nevýhody se při vyšších požadovaných teplotách, vyšších nárocích na přesnost regulace teploty a lepší přenos tepla do pájeného spoje více projevují a proto je jejich použití pro bezolovnatý proces zatím problematičtější.

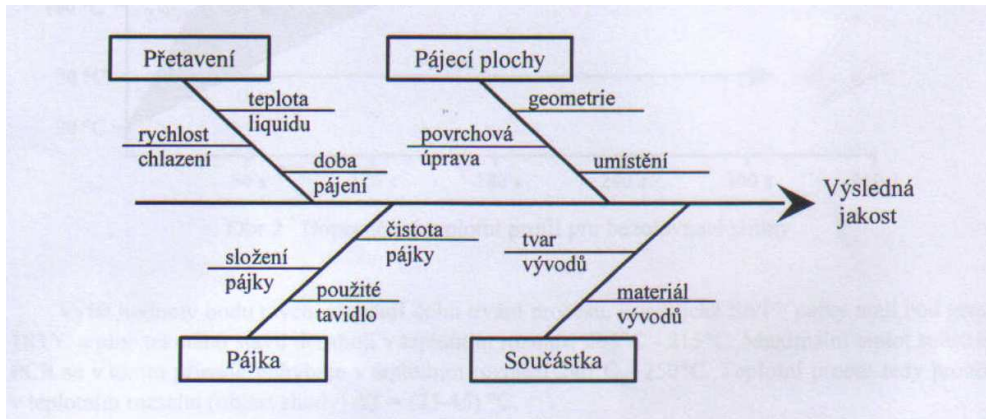
Pece pro pájení přetavením prochází neustálým vývojem spočívajícím nejen v systému urychleného proudění, ale i v dalších konstrukčních zlepšeních, kteří zahrnují především:

- zvětšení počtu přetavovacích zón a změnu v konfiguraci těchto zón
- redukci celkové délky pece
- zlepšené možnosti centrování desky
- řízený proces chlazení desky minimálně ve dvou zónách
- systém odsávání a filtrace výparů tavidel
- snížení elektrické spotřeby celé pece
- cirkulační systémy vyhřívaného média

Nově vyvinuté přetavovací pece již standardně nabízejí zpracování bezolovnatých past. Problém většiny uživatelů bude spíše to, jestli jeho současné vybavení bude postačující pro nové požadavky.

### 3.2.4 Teplotní profil pro pájení přetavením

Stanovení optimálního teplotního profilu (závislost průběhu teploty na čase) prochází jistým vývojem. Optimálním teplotním profilem se rozumí takový profil, který zajistí maximální jakost a životnost pájeného spoje. Zachytit všechny technologické faktory působící v procesu pájení je velmi obtížné, avšak alespoň ty nejdůležitější jsou znázorněny v Ishikawově diagramu.



graf 5: Ishikawův diagram pro proces pájení

Z diagramu je patrné, že v procesu pájení působí na životnost spoje čtyři základní faktory – pájecí proces, pájecí slitina, pájecí plochy a pájené součástky. Tento diagram se velmi často využívá pro analýzu procesu a hledání jeho optimálních variant.

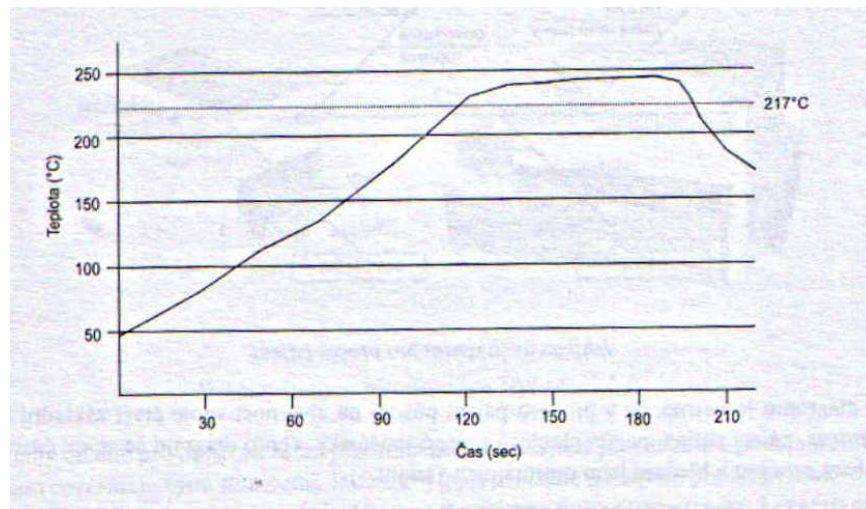
Univerzální doporučený teplotní profil neexistuje. Profily doporučují výrobci pájecích past, součástek i přetavovacích pecí. Tyto profily se vzájemně odlišují, ale zároveň mají mnoho společného. Shodují se ve vyšších teplotách předehřevu, vyšších maximálních teplotách a požadovaných gradientech náběhu teploty a rychlosti chlazení.

#### Ustálily se dva typy pájecích profilů:

- profil s výdrží na předehřívací teplotě (pod bodem likvidu pájecí slitiny) RSS
- profil s postupným nárůstem teploty během celého předehřevu RTS

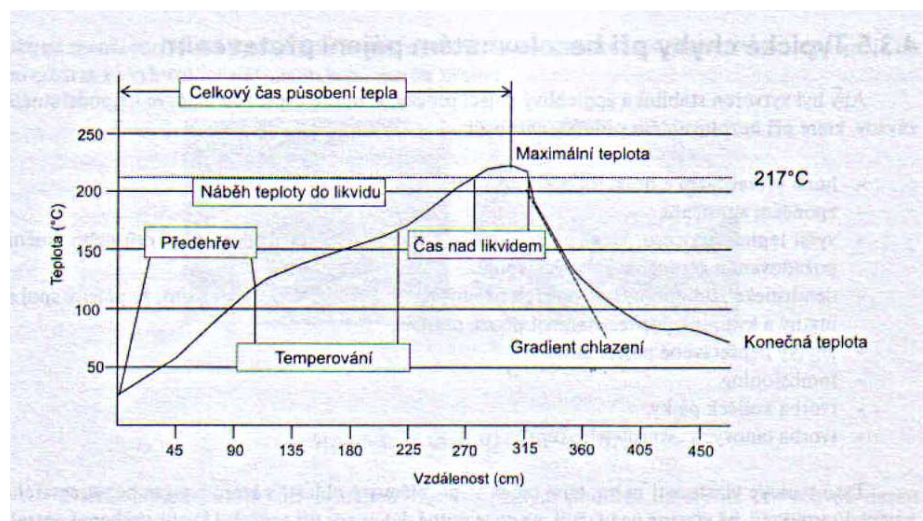
Profil s postupným nárůstem teploty se ukazuje jako výhodnější pro menší teplotní zátěž sestavy a ve spojení s dobrým přenosem tepla v peci a vhodným tavidlem zajišťuje dobré výsledky. Zejména u nově formulovaných tavidel (vykazují při lineárním profilu dostatečnou aktivitu smáčení) a pecí s dobrým přenosem tepla je nutno tento profil upřednostňovat. Profil se vyznačuje přibližně lineárním průběhem až k vrcholné zóně. Vzestup teploty by měl být v této fázi, která by měla činit 2/3 celkového procesu, 0,6 – 1,8°C/s. V této fázi lineárního vzestupu teploty probíhá předehřívání, aktivace tavicí přísady a odpaření. Tento profil je doporučován při použití pájecích past rozpustných ve

vodě. Protože vzestup teploty lze velmi dobře kontrolovat, je možné zabránit známým problémům při pájení i teplotnímu šoku. V neposlední řadě vede k lesklejším spojům.



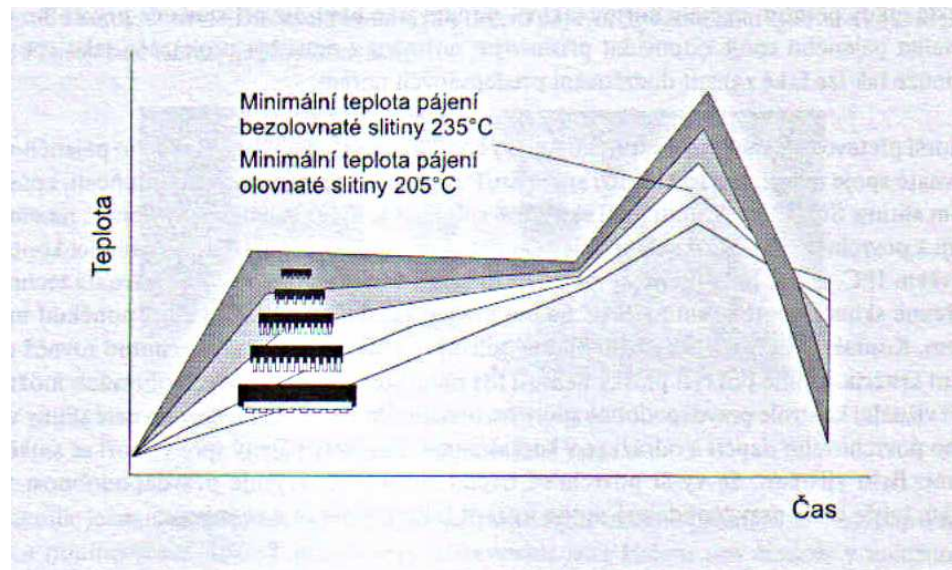
graf 6: RTS – Ramp To Spike Profile

Profil s výdrží zase lépe zajistí prohřátí sestavy před překročením teploty likvidu pájecí slitiny, čímž se sníží rozdíl teplot na sestavě tzv. delta T. Je to rozsah teploty mezi nejvyšší a nejnižší teplotou na jedné konstrukční skupině v daném časovém okamžiku. Velká delta T uvádí, že některé sektory na jedné konstrukční skupině dostávají více, jiné méně tepla. Velká hodnota delta T tedy vede ke stálé nejistotě procesu a při pájení vždy nabízí nové nepříjemnosti jako např. kuličky pájky, špatné smáčení, narušené konstrukční díly nebo tmavé zbytky. Tento profil s výdrží je tedy použitelný tam, kde není dobrý přenos tepla v peci, zejména u starších pecí.



graf 7: RSS – Ramp Soak Spike Profile

Následující obrázek ukazuje jak se mění požadavek na profil přetavení pro různě velké součástky.



graf 8: profily přetavení pro různé SMD

### 3.2.5 Typické chyby při bezolovnatém pájení přetavením

Aby byl vytvořen stabilní a spolehlivý pájecí proces, je nutné uvést zde nejprve nejpodstatnější závady, kteřé při bezolovnatém procesu nastávají:

- horší přetavování a horší tokové vlastnosti
- zpoždění substrátu
- vyšší teploty procesu, které mohou způsobit poškození konstrukčních prvků nebo změnit požadovanou geometrii pájených spojů
- zbytky nepřetavené pájecí pasty
- tvorba kuliček pájky
- tvorba cínových „vousů“

Tyto typické problémové oblasti, které proces bezolovnatého pájení doprovázejí, již naznačuje na co je nutné dávat pozor při zajištění kvality.

Horší přetavovací vlastnosti slitin Sn/Ag/Cu komplikují vytvoření bezchybného pájeného spoje. Bezolovnaté spoje nejsou tak lesklé jako spoje Sn/Pb v důsledku

mikroskopické hrubosti, způsobené tuhnutím slitiny. Lesk nebyl řadu let kontrolním požadavkem IPC (norma o kvalitě), avšak řada firem je používá jako kritérium jakosti. Bezolovnatá technologie s tím zřejmě skončí, protože slitiny SAC budou pravděpodobně opouštět linku s poněkud matným vzhledem. Kontaktní úhly a míra rozlití budou odlišné což povede k změně k úpravě kontrolních kritérií. Mezené rozlití vyplývá z vyššího povrchového napětí a odráží se v kontaktním úhlu, který pájený spoj vytvoří se smáčenými plochami.

## ZÁVĚR

Zákaz použití olovnatých pájek v elektrotechnice znamená zavedení mnohých změn do elektrotechnického průmyslu. Učíme se používat nové materiály, vyvíjíme nová výrobní zařízení, popřípadě upravujeme stávající zařízení tak, aby maximálně vyhovovala, zavádíme nové technologie zpracování a učíme lidi novému přístupu k problematice bezolovnatého pájení.

Samozřejmě jsme na začátku zavádění bezolovnatého pájení a již za několik málo let nemusí platit to, co dnes považujeme za nejvhodnější a nejpříjemnější.

Dnes se stalo jistotou, že zavedení bezolovnaté technologie je možné. Nově používané materiály pájek jsou dražší, ale mají vyšší teplotu tavení, což přináší nová úskalí nejen z hlediska zvýšené energetické náročnosti na ohřev pájek a udržení její optimální teploty, ale také na samotné nanášecí zařízení jsou tímto kladeny zvýšené nároky. Vyšší teplota znamená i vyšší teplotní namáhání pájených součástí.

Na druhou stranu zavedení bezolovnatého pájení přináší i některá vylepšení vlastností výrobků.

Jako všechny zásadní změny, tak i zavedení bezolovnatého pájení se neobejde bez pečlivé přípravy a dobrých znalostí technické problematiky, kvalitní systém řízení jakosti procesů. Nutná je také spolupráce s dodavateli součástí a materiálů k pájení.

Hlavním důvodem zavedení bezolovnatých pájek je zlepšení životního prostředí na zemi. Snaha o zlepšení životního prostředí se osobně dotýká každého z nás.

## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

Lead solder prohibition means a lot of changes in electrotechnical industry. We are learning to use new materials, developing new equipment or modifying existing so they can be used for unleaded solders, implementing new technologies, we train people to get new approach to unleaded solder.

Of course we are at the beginning of unleaded solders implementation but in few years the what is now the considered as best could be no longer valid.

Nowadays the unleaded solder implementation become possible. New solders are more expensive, but have higher melting point, what brings new challenges from energy point of view. We need more energy to heat up the solder and to keep the optimum temperature and implementation of solder itself is challenging as well. Higher temperature also means higher thermal load to electronic components.

On the other hand implementation of unleaded solder brings some improvements.

As any other changes unleaded solder implementation requires precise preparation, good technical knowledge of this brand, quality system implemented to control all related processes.

Absolutely necessary is cooperation with solder and part suppliers.

Main implementation reason is environment improvements. Environment improvement effort is every single one interest.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [ 1 ] ABEL, M. , CIMBUREK, V. Bezolovnaté pájení v legislativě a praxi.1 vyd.  
Pardubice: ABE. TEC, 2005. 179 s. ISBN 80- 903597- 0- 1.
- [ 2 ] ABEL, M. SMT technologie povrchové montáže. 1. vyd. Pardubice: Platan, 2000.  
245 s. ISBN 80- 902733- 1- 9.
- [ 3 ] Stránky ministerstva životního prostředí. Dostupné z WWW: < [http:// www.env.cz](http://www.env.cz) >
- [ 4 ] Stránky IPC pro bezolovnaté pájení. Dostupné z WWW :< <http://www.leadfree.org>>
- [ 5 ] Stránky věnované technologii plošné montáže. Dostupné z WWW :  
<<http://www.smtcentrum.cz>>
- [ 6 ] Pájecí technika – ruční pájení . Dostupné z WWW: <<http://www.hakko.cz>>
- [ 7 ] Pájecí technika – strojní pájení. Dostupné z WWW: <<http://www.kirsten.cz>>

## **SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

SMT – technologie povrchové montáže

SMD - povrchová montáž součástek

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

OBRÁZEK 1: MODEL SMÍŠENÉ CESTY OLOVA Z PÁJENÝCH SUBSTRÁTŮ DO PITNÉ VODY .....	9
OBRÁZEK 2: METODY PÁJENÍ .....	11
OBRÁZEK 3: INTERMETALICKÝ SPOJ .....	12
OBRÁZEK 4: STYKOVÝ ÚHEL .....	15
OBRÁZEK 5 : TRHLINY VRSTVY .....	17
OBRÁZEK 6: JEDNOTLIVÉ OPERACE STROJNÍHO PÁJENÍ .....	18
OBRÁZEK 7: NAKLONĚNÍ PÁJENÉ DESKY .....	19
OBRÁZEK 8 : TYPY VLN .....	20
OBRÁZEK 9: JEDNODUCHÁ VLNA .....	22
OBRÁZEK 10 - DVOJITÁ PÁJECÍ VLNA. PRVNÍ VLNA JE TURBULENTNÍ, DRUHÁ VLNA JE ŠIROKÁ LAMINÁRNÍ... ..	23
OBRÁZEK 11: DUTÁ VLNA .....	24
OBRÁZEK 12: SÍTOTISK .....	29
OBRÁZEK 13: SÍTOTISK .....	30
OBRÁZEK 14: TISK PŘES ŠABLONU .....	31
OBRÁZEK 15: PÁJENÍ V PÁŘE .....	32
OBRÁZEK 16: KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ WOLFRAMOVÉHO ZÁŘIČE .....	33
OBRÁZEK 17: JEDNODUCHÝ MODEL PŘETAVOVACÍ PECE S INFRAZÁŘIČEM .....	33
OBRÁZEK 18: ZAHŘÍVACÍ MODUL N PRINCIPU PÁJENÍ .....	34
OBRÁZEK 21: PŘÍKLADY VAD PÁJENÝCH SPOJŮ .....	50
OBRÁZEK 22: PŘÍKLADY VAD PÁJENÝCH SPOJŮ .....	51
OBRÁZEK 23: PROCESNÍ OKNO .....	53

**SEZNAM TABULEK**

TABULKA 1: KLASIFIKACE TAVIDEL .....	14
TABULKA 2: SLOŽENÍ A DĚLENÍ PÁJECÍ PASTY .....	25
TABULKA 3: PODÍL OXIDŮ V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI ZRN.....	26
TABULKA 4: ROZDĚLENÍ VELIKOSTI ZRN .....	27
TABULKA 5: FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PÁJKY U SLITIN SAC .....	41
TABULKA 6: MEZ PEVNOSTI V TAHU MPA PŘI 20°C .....	43
TABULKA 7: PARAMETRY RŮZNÝCH SLITIN.....	49

## SEZNAM GRAFŮ

GRAF 1: TEPLTNÍ PROFIL PÁJENÍ PŘETAVENÍM INFRAČERVENÝM ZÁŘENÍM NEBO NUCENÝ PROUDĚNÍM .....	35
GRAF 2: DOPORUČENÝ TEPLTNÍ PROFIL PRO BEZOLOVNATÉ SLITINY .....	36
GRAF 3: FÁZOVÝ DIAGRAM PRO SLITINY CÍN – OLOVO.....	37
GRAF 4: ROZDÍLNÝ PROFIL PRO Sn/Pb A Pb-FREE PASTY .....	54
GRAF 5: ISHIKAWŮV DIAGRAM PRO PROCES PÁJENÍ.....	56
GRAF 6: RTS – RAMP TO SPIKE PROFILE .....	57
GRAF 7: RSS – RAMP SOAK SPIKE PROFILE .....	57
GRAF 8: PROFILY PŘETAVENÍ PRO RŮZNÉ SMD .....	58