

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Technologie kontaktování v elektronice**

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

### ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Marek ZEKUCIA</b>
Osobní číslo:	<b>E17B0039K</b>
Studijní program:	<b>B2644 Aplikovaná elektrotechnika</b>
Studijní obor:	<b>Aplikovaná elektrotechnika</b>
Téma práce:	<b>Technologie kontaktování v elektronice</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky</b>

#### Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši současného stavu kontaktování součástek v elektrotechnice.
2. Věnujte pozornost nejen kontaktování součástek ke konvenčním ale i flexibilním (Tišťená elektronika) či textilním (Smart textilie) substrátům.
3. Zhodnoťte využívané metody a možnosti jejich využití.




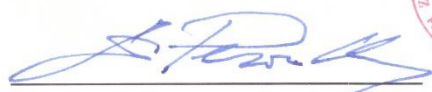
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

## Seznam doporučené literatury:

1. P. Mach, V. Skočil, and J. Urbánek, Montáž v elektrotechnice, 1st ed. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
2. K. K. Christenson, J. a Paulsen, M. J. Renn, K. McDonald, J. Bourassa, and S. Paul, Direct Printing of Circuit Boards Using Aerosol Jet , NIP 27 Digit. Fabr., pp. 433436, 2011.
3. N. Grimmelsmann, Y. Martens, P. Schäl, H. Meissner, and A. Ehrmann, Mechanical and Electrical Contacting of Electronic Components on Textiles by 3D Printing, Procedia Technol., vol. 26, pp. 6671, 2016.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Navrátil**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



**Prof. Ing. Václav Kús, CSc.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na téma „Technologie kontaktování v elektronice“ a popisuje různé technologie kontaktování součástek k substrátům. V práci je především popsána technologie pájení a technologie lepení. Je zde také uvedeno bondování a kontaktování vodivým inkoustem pomocí Aerosol Jet®. V poslední části práce jsou uvedené substráty včetně možnosti jejich kontaktování a následně je uvedeno zhodnocení jednotlivých technologií.

## **Klíčová slova**

Kontaktování, pájení, lepení, svařování, Aerosol Jet®, wire-bonding, flip-chip, vytvrzování.

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the topic of contacting technology in electronics and describes various technologies for contacting components to substrates. Technologies of soldering of electronics components and bonding of electronics components are described in detail. There are also described technologies bonding and contacting with conductive ink using Aerosol Jet®. The last chapter discusses substrates, including the possibility of contacting them, and then the evaluation of individual technologies is presented.

## **Key words**

Contacting, soldering, bonding, welding, Aerosol Jet®, wire-bonding, flip-chip, curing.

## 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.

.....

podpis

V Plzni dne 16.6.2020

Marek Zekucia

## **Poděkování**

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

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TECHNOLOGIE PÁJENÍ</b> .....	<b>11</b>
1.1 PÁJENÝ SPOJ A DEFEKTY SPOJE.....	11
1.2 INTERMETALICKÉ SLOUČENINY.....	12
1.3 PÁJKY.....	12
1.3.1 Olovnaté pájky.....	13
1.3.2 Bezolovnaté pájky.....	13
1.4 TAVIDLA.....	14
1.5 RUČNÍ PÁJENÍ.....	15
1.6 STROJNÍ PÁJENÍ.....	16
1.6.1 Strojní pájení vlnou.....	16
1.6.2 Strojní pájení přetavením.....	17
<b>2 TECHNOLOGIE LEPENÍ</b> .....	<b>22</b>
2.1 IZOTROPNÍ ELEKTRICKY VODIVÁ LEPIDLA (ICA).....	24
2.2 ANIZOTROPNÍ ELEKTRICKY VODIVÁ LEPIDLA (ACA).....	25
2.3 ELEKTRICKY NEVODIVÁ LEPIDLA (NCA).....	27
<b>3 POROVNÁNÍ LEPENÍ A PÁJENÍ</b> .....	<b>30</b>
<b>4 BONDOVÁNÍ</b> .....	<b>31</b>
4.1 WIRE BONDING.....	31
4.1.1 Metody připojení (kontaktování) mikrodrátků.....	33
4.2 TAPE AUTOMATED BONDING.....	35
4.3 FLIP-CHIP.....	36
<b>5 KONTAKTOVÁNÍ POMOCÍ INKOUSTU</b> .....	<b>37</b>
5.1 AEROSOL JET®.....	37
<b>6 SUBSTRÁTY</b> .....	<b>39</b>
6.1 TUHÉ SUBSTRÁTY.....	39
6.1.1 Kontaktování tuhých substrátů.....	41
6.2 FLEXIBILNÍ SUBSTRÁTY.....	41
6.2.1 Tištěná elektronika.....	43
6.2.2 Hybridní elektronika.....	44
6.2.3 Kontaktování flexibilních substrátů.....	44
6.3 SMART TEXTILIE.....	46
6.3.1 Kontaktování inteligentních textilií.....	47
<b>7 ZHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH TECHNOLOGIÍ</b> .....	<b>52</b>
<b>8 ZÁVĚR</b> .....	<b>54</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>56</b>



## Seznam symbolů a zkratek

ACA.....	Anisotropic conductive adhesive ( <i>Anizotropní vodivé lepidlo</i> )
ACAF .....	Anisotropic conductive adhesive film ( <i>Anizotropní vodivý film</i> )
Bi .....	Bismut
COB.....	Chip on board
CO2.....	Oxid uličitý
DPS.....	Deska plošného spoje
ECA .....	Electrically conductive adhesive ( <i>Elektricky vodivé lepidlo</i> )
FCOB.....	Flip chip on board
ICA .....	Isotropic conductive adhesive ( <i>Izotropní vodivé lepidlo</i> )
In.....	Indium
LCD .....	Liquid Crystal Display ( <i>Displej z tekutých krystalů</i> )
NCA.....	Non-conductive adhesive ( <i>Nevodivé lepidlo</i> )
NCF .....	Non-conductive film ( <i>Nevodivý film</i> )
OLED .....	Organic light-emitting diode ( <i>Organické světlo emitující diody</i> )
OSP.....	Organic Solder Preservatives
Pb.....	Olovo
PC .....	Polykarbonát
PEN.....	Polyetylen-naftalen
PES .....	Polyester
PET.....	Polyethylentereftalát
PI.....	Polyimid
RoHS .....	Restriction of Hazardous Substances
SA.....	Sn-Ag
SAC .....	Sn-Ag-Cu
SB .....	Sn-Bi
SC .....	Sn-Cu
SMD .....	Surface mount device ( <i>Povrchová montáž</i> )
Sn.....	Cín
TAB .....	Tape automated bonding
THD .....	Through-hole technology
UV .....	Ultrafialové záření

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na technologie kontaktování elektronických součástek, které jsou využívány v dnešní době. Hlavní cíl práce je seznámit čtenáře s jednotlivými technologiemi kontaktování a jejich problematikou, použitím technologií pro jednotlivé substráty a jejich zhodnocení.

Práce je rozdělena do sedmi částí a závěru. První část je věnována technologii pájení. Jsou zde představeny defekty spoje, intermetalické vrstvy, pájky, tavidla a taktéž jsou zde popsány jednotlivé procesy pájení. Druhá část se zabývá lepení lepidly. V této části je seznámení s lepidly a také je zde popsáno rozdělení lepidel, jejich složení, použití a aplikace. Třetí oddíl je zaměřen na porovnání pájení a lepení z hlediska jejich výhod. Čtvrtá část se věnuje bondování, kde jsou popsány principy tří metod bondování. Pátá část je zaměřena na možnost využití inkoustu ke kontaktování součástek. V této části je popsána metoda Aerosol Jet® a princip kontaktování součástky. Ve zbývajících dvou částech jsou uvedeny jednotlivé druhy substrátů a zhodnocení metod. Substráty jsou tu rozděleny na tuhé, flexibilní a textilní. U každého typu substrátu je pak uvedena možnost jejich kontaktování a kapitola flexibilní substráty obsahuje navíc popis tištěné a hybridní elektroniky. Poté následuje část zhodnocení, ve které jsou zhodnoceny jednotlivé metody z hlediska jejich výhod a využití.

# 1 Technologie pájení

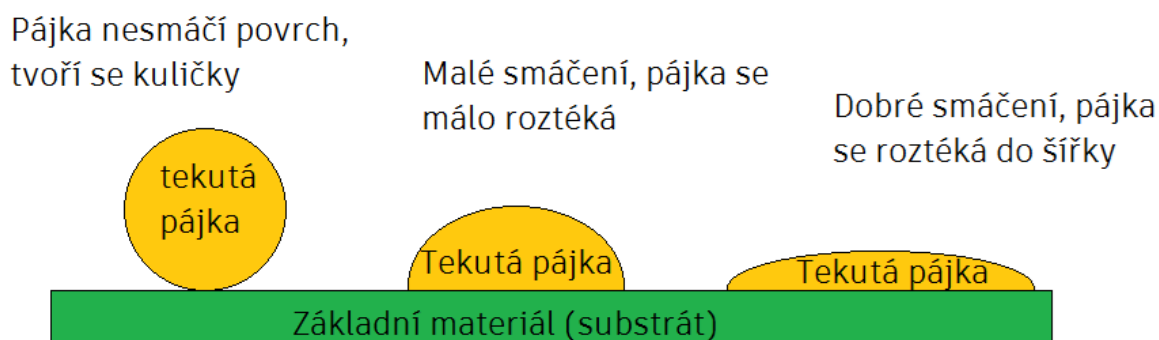
Pájení je metalurgický způsob spojování materiálů, u kterého se taví (na rozdíl například od svařování) jen pájecí slitina. Pájecí slitina se používá pro připojení a zároveň připevnění součástky k desce plošného spoje. Pro pájení platí, že teplota pájecí slitiny (pájky) musí být vždy menší, než teploty, při kterých se taví spojované části. [1]

Nejrozšířenějším způsobem pájení je měkké pájení. Velká výhoda měkkého pájení je hromadnost, to znamená, že lze zhotovit stovky spojů současně. Teplota tavení pájecích slitin je do 450 °C. Pájky pro měkké pájení obsahují obvykle cín nebo jeho slitiny s olovem. Existuje také tvrdé pájení, kde se pájí v ochranném plynu nebo ve vakuu. Teplota tavení pájky při tvrdém pájení je nad 450 °C a taví se nejčastěji pomocí plamenu. Obvykle se používají stříbrné nebo mosazné tvrdé pájky ve formě drátu, zrna nebo pásu. Tvrdé pájení je používáno tam, kde jsou spoje určeny k silovému zatížení. [1], [10], [24]

## 1.1 Pájený spoj a defekty spoje

Tvorba pájeného spoje probíhá na rozhraní mezi pájeným předmětem a pájkou. Z fyzikálního hlediska je snaha při pájecím procesu získat mechanicky pevný a spolehlivý spoj. [1], [29]

Při pájecím procesu mohou vzniknout defekty, které jsou způsobeny nedodržením podmínek pro kvalitní spoj. Nejdůležitější podmínky pro vznik kvalitního spoje jsou správná pracovní teplota, dobrá smáčivost povrchu (Obr. 1), správně zvolený druh pájky a její množství. Jeden z nejčastějších defektů, který se vyskytuje, je tzv. studený spoj. Studený spoj vznikne, když pájka nevytvoří elektrický kontakt nebo kontakt mezi součástkou a pájecí ploškou nebude dobrý (kontakt bude mít velký odpor). Nevytvořený elektrický kontakt je způsoben znečištěním součástky nebo plošky (nemuselo se na požadované místa dostat tavidlo). Defekt spoje také může vzniknout při posunutí součástky mimo kontaktní plochu. Další častý defekt je zkrat. Zkrat vzniká hlavně při použití součástek s více vývody blízko u sebe a zároveň s použitím nesprávného množství pájky (je použito větší množství, než je potřeba). Pájka se po roztavení rozteče i k ostatním vývodům, které jsou blízko u sebe a elektricky je propojí. [30], [31]



Obr. 1 Smáčivost pájky na povrchu.

## 1.2 Intermetalické sloučeniny

Jedná se o sloučeniny, které se vytváří během pájení na rozhraní mezi kovovou ploškou a pájkou. Intermetalická vrstva vzniklá na rozhraní mezi cínem a mědí nabývá podobu sloučenin  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  a  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Je základním předpokladem pro pevnost konečného spoje. Také však může nepříznivě ovlivňovat pájitelnost. Cín při pájení se zlatem, niklem nebo stříbrem vytváří obdobné sloučeniny jako při použití mědi. Tloušťka vzniklé intermetalické vrstvy je závislá na čase a teplotě. [1], [9], [29]

- **Intermetalická sloučenina  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$**

Vytváří se na rozhraní mědi a pájky po smočení povrchu. Vzniklá sloučenina bude mít tloušťku několik desetin mikrometru. Vznik vrstvy nám dává jistotu pevné vazby pájky ke kovu a zároveň je to podmínka pro dobré smočení povrchu. Teplota tání sloučeniny je  $415\text{ }^\circ\text{C}$  a obvykle mívá šedou barvu. [1]

- **Intermetalická sloučenina  $\text{Cu}_3\text{Sn}$**

Vzniká při určitých podmínkách na rozhraní mezi mědí a intermetalickou sloučeninou  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Je to sloučenina, kterou pájka nesmáčí. K obnovení stavu pájitelnosti je nutné tuto sloučeninu odstranit (odleptat). Teplota tání je více než  $670\text{ }^\circ\text{C}$ . [1]

## 1.3 Pájky

Jsou tvořeny kovy, které mají nízkou teplotu tavení. Obvykle se jedná o dvou- nebo třísloužkové slitiny, čisté kovy. Pájky bývají z cínu, olova nebo zinku. Mohou také obsahovat indium, měď, bismut nebo stříbro. Nejčastěji používaná pájka je z cínu, díky tomu, že ji lze spojit skoro se všemi kovy. [1]

### 1.3.1 Olovnaté pájky

Nejčastěji užívanou olovnatou pájkou byla slitina cín-olovo (Sn-Pb), která obsahovala 63 % cínu a 37 % olova. Tato slitina byla nejčastěji používána při měkkém pájení v elektrotechnice až do roku 2006. Nejnižší teplota tavení z cín-olovnatých slitin je 183 °C. [26]

### 1.3.2 Bezolovnaté pájky

Většina dříve používaných pájecích slitin obsahovala toxické olovo. Dle direktivy RoHS (**R**estriction of **H**azardous **S**ubstances - omezení nebezpečných látek) z roku 2006 došlo k zákazu používání olova ve spotřební elektronice a tím i k omezení olova v pájecích slitinách. Z důvodu zákazu používání olova se proto hledala náhradní řešení. Vývojem se došlo k řešení, v nichž byla snaha o nalezení pájecích slitin bez olova, aniž by bylo nutné zavést revoluční změny technických zařízení a postupů, které se používají u slitin s olovem. Došlo se k řešení nahradit olovo (Pb) v pájecích slitinách jinými doplňujícími kovy, jako jsou například příměsi mědi (Cu) a stříbra (Ag). Doplňující kovy pomohly pájecí slitině ke splnění požadavků na pájený spoj, jelikož samostatný čistý cín tyto požadavky nesplňuje. Vznikla pájecí slitina Sn-Ag-Cu (SAC). [1], [25], [64]

Nevýhoda oproti olovnatým pájkám je v teplotě tavení, která je vyšší. Pro snížení teploty tavení je možné jako doplňující kov použít indium (In), jak je možné vidět v tabulce (Tab. 1). Ovšem indium a pájky s obsahem india jsou velmi drahé. Další nevýhoda bezolovnatých pájek je horší smáčivost a větší náchylnost k oxidaci. Taktéž se zde vyskytuje problém se vznikem tzv. whiskerů. Whiskery jsou mikroskopická vodivá vlákna vlasovité struktury, která spontánně vyrůstají na povrchu cínu a mohou být až 100krát tenčí než lidský vlas. Dorůstají délek, při kterých může dojít k dotyku s jinou vodivou částí a způsobit zkrat. [26], [28], [65]

Mezi nejčastěji používané bezolovnaté slitiny patří SAC (Sn-Ag-Cu), SC (Sn-Cu), SA (Sn-Ag) a SB (Sn-Bi) s různými poměry mezi jednotlivými složkami. [27]

Tab. 1 Přehled tavicích teplot vybraných pájecích slitin

Pájecí slitiny	Sn-Pb	Sn-Ag-Cu	Sn-Ag-In	Sn-Ag
Tavicí teplota [°C]	183	217	200	221

## 1.4 Tavidla

Tavidlo je látka, která se používá v pájecím procesu a slouží k odstranění oxidové vrstvy a dalších nečistot nacházejících se na povrchu pájeného předmětu. Odstraněním oxidové vrstvy a nečistot dojde ke snížení povrchového napětí na pájce a tím k eliminaci vytvoření můstků a krápníků. Dále by tavidlo mělo mít viskozitu takovou, aby napomohla ke smáčení pájky. Tavidla mohou být dávkována samostatně, či mohou být již složkou pájecí slitiny ve formě např. trubičky či pasty. [1]

Tvorba pájeného spoje nebo ohrožení funkce elektronického zařízení jsou parametry, podle kterých hodnotíme tavidla. Zbytky tavidel, jako jsou například elektricky vodivé zbytky, jsou nežádoucí a musí být odstraněny např. oplachem. Jejich odstranění je ale nákladné a někdy i nesnadné, a proto se používají tzv. bezoplachová tavidla. Bezoplachová tavidla není nutné odstraňovat po pájecím procesu a musí splňovat určité požadavky, jako jsou nezanechávání korozivních a lepidlivých zbytků, splňovat předpisy o ochraně zdraví a bezpečnosti, zajišťovat výbornou pájitelnost. [1], [63]

Teplota tavení tavidla je nižší než teplota tavení pájky. Obvykle bývá tato teplota nižší o 50 °C až 100 °C. Pro měkké pájení jsou jako tavidla použity kyseliny nebo kalafuna (viz Tab. 2). Pro tvrdé pájení se může použít borax nebo kyselina boritá. [30]

Tab. 2 Přehled tavidel pro měkké pájení, převzato a upraveno z [1]

Typ tavidla	Základ tavidla	Aktivátor
Pryskyřičná	Kalafuna	Bez aktivátoru
	Umělá pryskyřice	Halogenový aktivátor
		Nehalogenový aktivátor
Organická	Vodou rozpustná	Bez aktivátoru
	Vodou nerozpustná	Halogenový aktivátor
		Nehalogenový aktivátor
Anorganická	Soli	S chloridem amonným
		Bez chloridu Amonného
	Kyseliny	Kyselina fosforečná
		Jiná kyselina
	Zásady	Aminy nebo čpavek

Pájení je možné provést i bez použití tavidel, pokud lze zajistit odstranění oxidů z povrchu jiným způsobem. Jeden ze způsobů je založen na použití zařízení využívající působení plasmatu. Celý proces probíhá v dusíkové atmosféře z důvodu zamezení druhotné oxidace. Proces probíhá průchodem osazených desek komorou, ve které snížený tlak s plasmatem zbavuje povrch oxidů, následně je deska přivedena do zařízení, které využívá pájení vlnou. Další způsob je použití ultrazvuku ve vlně pájky. I zde je potřeba, aby proces probíhal v dusíkové atmosféře. [1]

## 1.5 Ruční pájení

Ruční pájení je nejstarší způsob pájení a zároveň nejrozšířenější a nejznámější mezi veřejností, ale také ekonomicky náročný (zvýšená cena montážních prací). Ruční pájení totiž vyžaduje vysokou zručnost a zkušenost, aby byly dodrženy stále podmínky a neměnná kvalita spoje. Jeho nevýhodou je také velká nepřesnost a malá produktivita. Nepřesnosti vznikající při pájení jsou způsobeny hlavně pracovníkem, který při pájení není schopen opakovat úkony se stejnou kvalitou, která je rozhodující pro kvalitu vzniklého spoje. Dalším velkým problémem je zvýšené riziko elektrostatického výboje. Proto se ruční pájení spíše hodí pro opravu chyb vzniklých během strojního pájení či pro prototypovou a laboratorní výrobu. [1], [12]

Tento druh pájení se obvykle provádí pomocí ruční pájecí stanice. Hrot se zahřeje na teplotu potřebnou k roztavení pájky a přiloží se k součástce spolu s pájecí slitinou. Před

začátkem pájecího procesu je velice důležité odstranit z hrotu nečistoty a další rezidua z předešlého pájení. Nečistoty na hrotu by se mohly negativně projevit na kvalitě výsledného spoje. [10], [11]

Pro ruční pájení platí, že maximální teplota pájky by neměla přesáhnout o více jak 100 °C maximální teplotu pevné fáze, tedy např. u Sn-Ag-In pájky by teplota neměla přesáhnout 300 °C. Mezi pájeným spojem a hrotem se musí teplota během pájení pohybovat nad bodem tání pájky, ale pod 260 °C, jinak může dojít v pájeném spoji k nadměrnému nárůstu difúzní vrstvy a dochází také k poškození součástek. [5]

## 1.6 Strojní pájení

Jedná se o technologie, kde pájení je prováděno pomocí automatizovaných zařízení (strojů). Zařízení určená pro strojní pájení musí poskytovat standardizované podmínky pro tvorbu pájených spojů zaručující vysokou výtěžnost a minimální chybovost při pájení. [1]

### 1.6.1 Strojní pájení vlnou

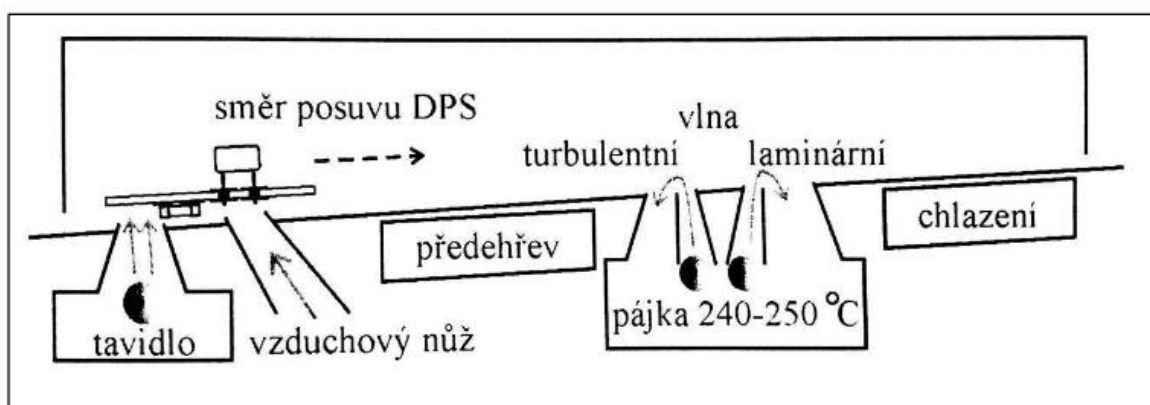
Strojní pájení vlnou (Obr. 2) je proces, při kterém je deska se součástkami smáčena vlnou, která je vytvořena z roztavené pájky. Operace potřebné pro pájení jsou konány automaticky a nedochází k ovlivnění výroby subjektivním vlivem pracovníka. Při pájení vlnou jsou desky plošných spojů osazeny součástkami pro povrchovou montáž (SMD) nebo součástkami s vývody, které se vkládají do děr (THD). [1], [6]

Proces pájení vlnou se skládá z několika kroků. Vložení desky se součástkami na dopravník, nanesení tavidla, předehtání, pájení vlnou, ochlazení desky a vyložení desky z dopravníku. Tímto pájením lze pájet jak SMD tak THD součástky. V případě použití SMD součástek je potřeba součástky na spodní stranu desky přilepit speciálním lepidlem. [12], [13], [36]

Při pájení vlnou ještě před smáčením povrchu desky pájkou musí proběhnout nanesení tavidla a předehtev desky se součástkami. Tavidlo se aplikuje na stranu desky, která bude pájena (spodní strana). Při nanášení tavidla (tavidlo musí být v kapalném stavu) je potřeba kontrolovat množství, které bude nanášeno, aby nedošlo k vytvoření nekvalitního spoje (např. studený spoj). Tavidlo lze nanášet více způsoby, jako např. vlnou (tekutou nebo ve



formě pěny) nebo nástřikem. Po nanesení tavidla se deska se součástkami předeřeje, aby došlo k odstranění těkavých složek tavidla a ke snížení tepelného šoku desky se součástkami. Po předeřevu následuje pájení, kde se smáčí povrch desky plošného spoje pomocí vln, které jsou vytvořeny na hladině roztavené pájky pomocí čerpadla (deska se pohybuje nad touto hladinou). Čerpadlo obsahuje trysku, která je vytvarovaná, aby směr a rychlost proudění pájky zajistily dokonalé smočení všech připojovacích míst. Vlny, nad kterými se deska pohybuje, mohou být dvě, a to: turbulentní, která zajišťuje dokonalé smáčení všech pájených povrchů, a laminární, která zajišťuje homogenní spoj (vytvoření kužele pájky na spoji). Obvyklá doba kontaktu desky s vlnou roztavené pájky je 2 až 4 sekundy (roztavená pájka se nachází v zásobníku). Aby byl smáčen jen povrch, na kterém mají být vytvořené pájené kontakty, je zbytek povrchu desky chráněn nepájivou maskou. [1], [6], [13], [66]



Obr. 2 Pájení vlnou, převzato z [66].

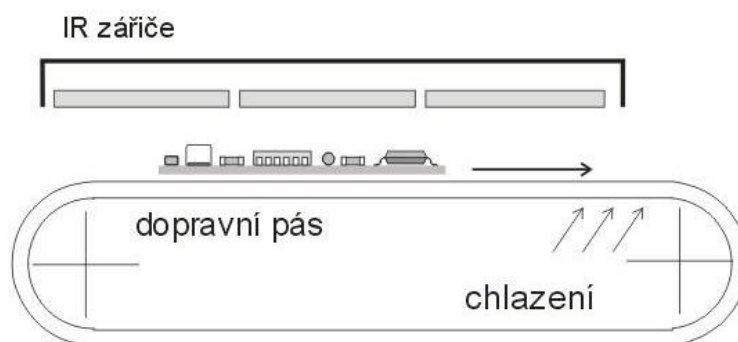
### 1.6.2 Strojní pájení přetavením

Pájení přetavením je proces, při kterém dochází k ohřátí desky se součástkami (nebo jen určitého místa na desce) na vysokou teplotu, aby došlo k roztavení pájky. Nejčastěji se používá pro povrchovou montáž. Před začátkem pájecího procesu se na povrch pájených předmětů nanese potřebné množství pájecí pasty (obsahuje pájku a tavidlo). Poté se deska se součástkami umístí na dopravník, který dopraví desku do místa ohřevu, kde dojde k ohřevu na požadovanou teplotu. V místě ohřevu dojde k ohřátí desky nebo pouze místa, kde se nachází vývod součástky a pájka se po dosažení správné teploty roztaví. Poté deska opouští místo ohřevu a je řízeně ochlazena, aby se předešlo vzniku prasklin, či mechanických deformací. [1], [12]

Způsoby pájení přetavením:

- **Zářením**

Pájení zářením je proces, u kterého deska plošných spojů s osazenými součástkami a pájecí pastou absorbuje záření různých vlnových délek. Absorbování vlnových délek je závislé na barvě povrchu. Součástky s tmavší barvou jsou více zahřívány než se světlou barvou. Jako zdroj záření se využívají různé infrazářiče, které jsou umístěny pod i nad dopravním pásem. [1], [4]

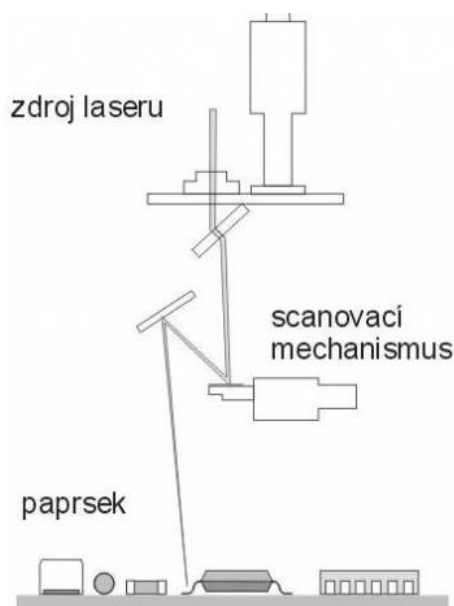


Obr. 3 Pájení zářením, převzato z [8].

- **Laserem**

Jedná se o proces, kdy se při pájecím procesu využívá tepla vytvořeného pomocí pulzních laserů, které mají záření v infračervené oblasti. Běžně používané laserové systémy jsou plynové (CO<sub>2</sub>) s vlnovou délkou 10,6  $\mu\text{m}$  nebo pevnolátkové (Nd:YAG) s vlnovou délkou 1,06  $\mu\text{m}$ . Tento typ pájení se používá především pro součástky citlivé na teplo, jelikož je zde možnost aplikovat teplo selektivně do místa vývodu připojované součástky a také pro součástky s malými roztečemi. Aby došlo k postupnému a pomalému natavování pájky na pájecí plošce, nesmí laserové záření dopadat kolmo na pájené místo z důvodu lokálního přehřátí a možnému rozstříkávání pájky. [1], [14]

Nesprávné podmínky pájení, jako je příliš vysoká energie nebo příliš krátká doba záření, mohou způsobit nehomogenní přenos tepla a budou mít za následek řadu vad, jako například studený spoj. [14]



Obr. 4 Pájení laserem, převzato z [68].

- **Impulsní**

Impulsní pájení je proces pájení, u kterého se využívá Joulových tepelných ztrát (rovnice 1.6.1) vznikajících průchodem proudu vodičem. Zahřívání spojů probíhá odporovým teplem vhodně tvarovaného nástroje. Tento nástroj (ve tvaru elektrody nebo ohnutého pásu) se přitlačí na vývody součástky položené na pájecích ploškách a potom je proudovými impulsy vyhříván na požadovanou teplotu. [1]

$$Q = R * I^2 * t \text{ [ J ]} \quad (1.6.1)$$

Tento způsob pájení se využívá pro pájení vývodů plochých a čtvercových pouzder s páskovými vývody na všech 4 stranách. Hlavní využití je při opravách osazených DPS. Při tomto procesu je dobré znát maximální proudové zatížení jednotlivých součástek, aby nedošlo k jejich zničení. [1], [4]

- **Kondenzační**

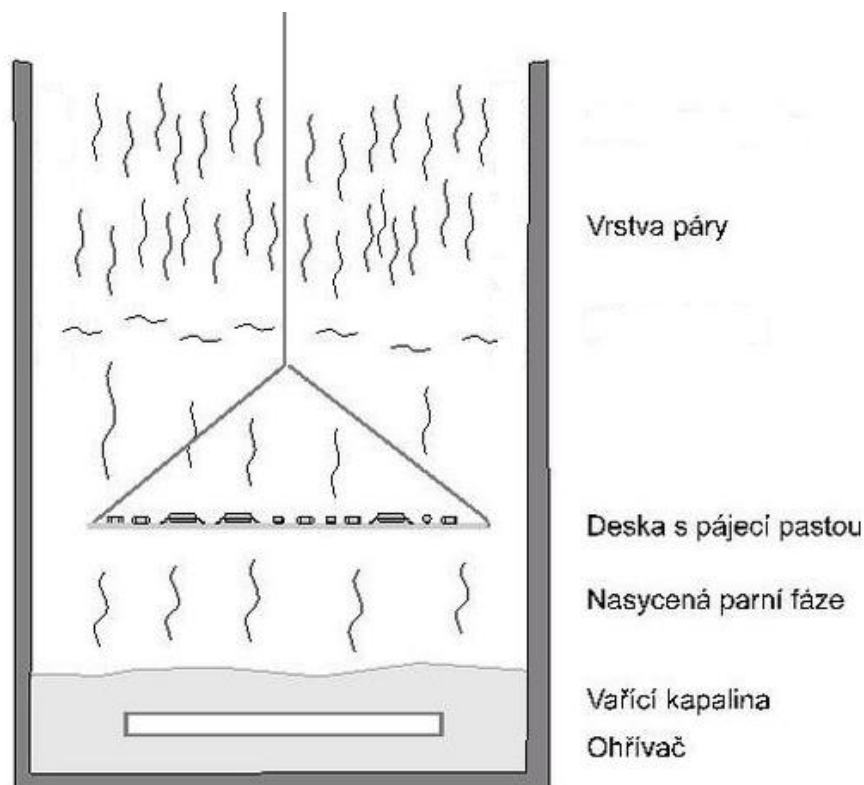
Kondenzační pájení neboli pájení v parách, je proces, při kterém dojde k zahřátí kapaliny na bod varu a kapalina se začne odpařovat. DPS je vložena do prostoru odpařování, kde se ohřívá. K ohřevu DPS dochází tak, že deska a vývody osazených součástek jsou ohřívány teplem vzniklým při kondenzaci par na chladných místech DPS (princip zobrazen na Obr. 5). Celý proces probíhá v parní komoře. [35], [36]

Teplota pro pájení je dána bodem varu kapaliny, díky tomu je v celém prostoru teplota konstantní. Jako kapaliny se zde využívají fluorouhlíkové kapaliny bez kyslíku. Po přivedení kapaliny do varu vzniknou páry, které v pájecím procesu vytlačují kyslík. Bezokyslíková atmosféra tedy výrazně zamezuje vzniku oxidů. Pro bezolovnaté pájení se používají kapaliny s bodem varu 240 °C. [1], [4], [14]

Při pájecím procesu musí být desky ponořovány do oblasti s přehřátými parami pomalu, aby nedošlo ke vzniku náhlého tepelného šoku a následnému předčasnému vymytí tavidla. [1]

- ***Kyselina mravenčí při pájení v parách***

Při pájení je obecně problém v odpařování tavidla. Tavidlo, které obsahuje kapalné složky, může během odpařování při vysoké teplotě způsobit vznik dutinek nebo bublin v pájeném spoji a tím způsobit nižší životnost spoje. Proto je snaha zajistit pájení bez tavidla, ale zároveň je nutnost zajistit odstranění povrchových oxidů z předmětů, které budou spojovány. K vyřešení tohoto problému se při pájení v parách začala používat kyselina mravenčí. Kyselina mravenčí zde má funkci jako kapalina pro přetavení a zároveň slouží také jako tavidlo. [37]



Obr. 5 Princip ohřevu v parách, převzato a upraveno z [35].

- ***Ohřevem horkou deskou nebo pásem***

Ohřev horkou deskou nebo pásem je postup pájení, kde je využito ohřevu desky k roztavení pájky. Vyhřívaná deska, na které jsou umístěné pájené předměty, má stanovenou teplotu, ta se pohybuje několik desítek stupňů nad bodem tání pájky. Ohřátím desky dojde i k ohřátí pájky a následnému roztavení pájky. Tento postup je využíván při výrobě hybridních integrovaných obvodů a soustav spojů na keramických podložkách. [1]

U starších zařízení byl nad deskami umístěn pás z tkaniny s dobrou tepelnou vodivostí. Na tomto pásu byly poskládány desky se součástkami. Ohřev probíhal vedením tepla z horké desky přes pás do desek se součástkami. [1]

- ***Pájení proudem horkého plynu***

Pájení proudem horkého plynu je proces, při kterém je teplo potřebné pro přetavení pájky dodáno pomocí plynu (nejčastěji vzduch nebo dusík), ten projde ohřívacím zařízením. Množství dodaného tepla je možno regulovat teplotou plynu a rychlostí proudění plynu. Horký plyn je na požadované místo usměrněn pomocí trysek. Proces pájení lze urychlit předehřátím pájených předmětů. Tato metoda je vhodná při opravách DPS. [1], [11]

## 2 Technologie lepení

Kromě bezolovnatých pájek lze použít ke kontaktování součástek k substrátům také lepidla. Tyto lepidla vznikla kolem roku 1965 v USA, kde je objevil profesor J. Morris. Jejich hlavním účelem je nahradit pájky tam, kde by použitím pájek mohlo dojít k poškození komponenty nebo substrátu z důvodu vysoké teploty tavení. Lepidla využívaná v elektronice lze rozdělit na elektricky vodivá a nevodivá. Elektricky vodivá lepidla se dále rozdělují na anizotropní lepidla a izotropní lepidla. [21], [58]

Lepidla využívaná v elektronice se pro správnou funkci musí nechat vytvrdit. Vytvrzování lepidel může probíhat teplem (teplota vytvrzení může být 140 °C i vyšší, ale zároveň také o dost menší) nebo UV zářením. Doba potřebná pro vytvrzování lepidel se může lišit, například pro teplotu 140 °C stačí doba vytvrzování 30 minut. Lepidla lze také vytvrzovat i při mnohem menší teplotě (např. pokojová teplota), ale poté doba vytvrzování činí i 100 hodin. Lepidla obvykle bývají na bázi pryskyřice a skládají se ze dvou základních složek. Jedna ze základních složek je tvořena nejčastěji nevodivou epoxidovou pryskyřicí a nazývá se vazební složka nebo také izolační matrice. Druhá základní složka obsahuje kovové částice a zajišťuje vodivost. Tato složka je označována jako plnivo nebo vodivá složka. V případě elektricky nevodivých lepidel je použita místo vodivé složky složka z nevodivého plniva. [1], [6], [21].

Nanášení lepidel lze uskutečnit pomocí sítotisku, šablonového tisku, dispenzním nanášením nebo pomocí jehličkového nanášení. [58]

- ***Vazební složka (izolační matrice)***

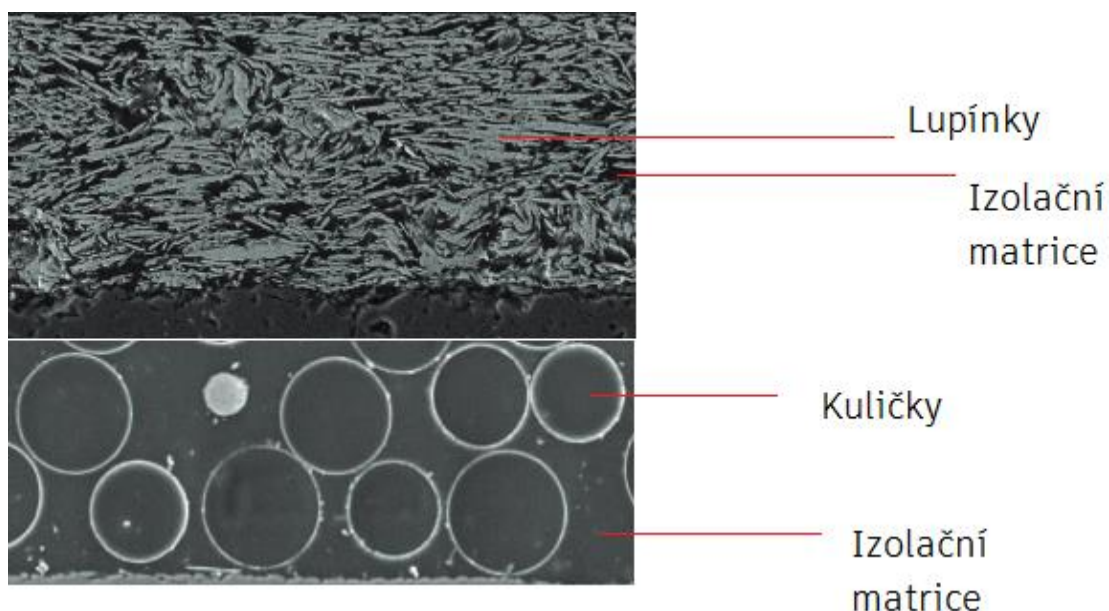
Účelem vazební složky je vytvořit izolační matici, ve které jsou umístěny vodivé částice (plnivo). Dále zajišťuje mechanické vlastnosti spoje, jako jsou pevnost, houževnatost, adheze nebo klimatická odolnost. Jako materiál vazební složky se ve většině případů užívá epoxidová pryskyřice. Dalšími užívanými materiály pro vazební složku jsou silikonové pryskyřice a polyamidové pryskyřice. Vazební složka může být jednosložková nebo dvousložková. V případě dvousložkové je přidáváno k pryskyřici tvrdidlo, které slouží k vytvrzení pryskyřice. Díky tvrdidlu lze potom lepidla vytvrdit i při pokojové

teplotě, ovšem je potřeba obě složky smíchat ve správném poměru a cena je také vyšší oproti jednosložkovému. [1], [6], [11]

- **Vodivá složka (filler)**

Vodivá složka, jinak také plnivo, má výrazný vliv na vodivé vlastnosti lepeného spoje. Je tvořena rovnoměrně rozptýlenými vodivými mikročásticemi. Částice jsou rozptýleny ve vazební složce a mohou být ve tvaru kuliček nebo lupínků (Obr. 6). [3], [6]

Obvykle používané plnivo jsou stříbrné (Ag) částice, mohou ale být použita plniva z měděných (Cu) částic (kuliček) pokryté stříbrnou vrstvou nebo niklové (Ni), grafitové či hliníkové, které jsou pokryté zlatou vrstvou. Každý z kovů má jiné vlastnosti, které určují, pro jakou aplikaci je vhodné jej použít. Mezi tyto vlastnosti patří například elektrická vodivost. Lepidla, která mají jako plnivo použity stříbrné, zlaté nebo palladiové částice, mají velmi dobré elektrické vlastnosti a zvláště stříbrné i velmi dobrou tepelnou vodivost. Jsou ovšem také velmi drahá. Z důvodu ceny se proto často používají niklové částice jako plniva pro vodivé spoje s nižšími nároky na vlastnosti spoje. Vodivé lepidlo by mělo obsahovat 25 – 80 % plniva, ale vždy záleží na typu lepidla a na použitém materiálu a tvaru částic. [2], [3], [5], [6]



Obr. 6 Pohled SEM mikroskopii na strukturu vodivého lepidla, horní část zobrazuje jako plnivo použité lupínky a dolní část zobrazuje jako plnivo kuličky, převzato a upraveno z [20].

## 2.1 Izotropní elektricky vodivá lepidla (ICA)

Izotropní vodivá lepidla byly navrženy jako alternativa k pájkám v povrchové montáži. Princip vodivosti je u nich stejný jako u pájek, takže zaručují vodivost ve všech směrech. [21]

- ***Složení vazební a vodivé složky***

Izotropní elektricky vodivá lepidla mají vazební složku vytvořenou z termoplastické nebo reaktoplastické pryskyřice. Jako termoplastická pryskyřice se nejčastěji používá polyimidová pryskyřice a to z důvodu, že ji lze snadno přepracovat (opravit vzniklý spoj). Ovšem nevýhoda termoplastických pryskyřic je v jejich přilnavosti (reaktoplastické pryskyřice mají vyšší přilnavost) a obsahu rozpouštědla. Rozpouštědlo se během vytvrzování odpařuje, což způsobuje vznik dutin ve spoji. Proto se mnohem častěji jako materiál pro vazební složku využívá reaktoplastické pryskyřice, nejčastěji epoxidová pryskyřice. Epoxidová pryskyřice nabízí dobrou přilnavost a dobrou chemickou a korozní odolnost. [21]

Vodivá složka neboli plnivo je tvořena kovovými částicemi (nejčastěji stříbro) ve tvaru kuliček nebo kombinací lupínků a kuliček. Obsah kovových částic ve vazební složce obvykle bývá 70 – 80 % a jejich velikost je kolem několika jednotek  $\mu\text{m}$  až 15  $\mu\text{m}$ . Obsah plniva má také vliv na mechanickou pevnost spoje. Pokud bude plniva příliš, tak se mechanická pevnost spoje zhorší. [3]

- ***Vytvrzování a nanášení ICA***

Při vytvrzení lepidla se kovové částice rovnoměrně rozloží a vytvoří síť uvnitř vazební struktury. Takto vytvořená síť pak umožní vodivost lepidla ve všech směrech. Lepidlo se vytvrzuje horkovzdušným nástrojem, v peci nebo UV zářením. [3], [70]

Nanášení izotropního lepidla lze provést pomocí tisku (sítotisk, inkoustový tisk, šablonový tisk) nebo dispensingem. [21]



- ***Aplikace a použití izotropního lepidla***

Před aplikací lepidla je nutné nejprve povrch, na který se bude lepit, chemicky a mechanicky důkladně očistit. Poté se nanese lepidlo pomocí jedné z metod nanášení. Do naneseného lepidla se osadí součástka a následně se lepidlo teplem vytvrdí. [6], [21]

Izotropními lepidly se propojují hlavně součástky, které jsou citlivé na teplo, a použitím pájení by mohlo dojít k jejich poškození. Tímto lepidlem se připojují součástky hlavně ke keramickým nebo flexibilním substrátům. [6], [70]

## **2.2 Anizotropní elektricky vodivá lepidla (ACA)**

Anizotropní vodivá lepidla mají vodivost pouze ve směru přítlaku na substrát (většinou osa z). Jejich hlavní využití je především pro kontaktování součástek z velmi malou roztečí vývodů, jelikož díky jejich vodivosti pouze ve směru přítlaku nemůže dojít ke zkratu mezi jednotlivými vývody. [21]

- ***Složení vazební a vodivé složky***

Anizotropní lepidla se vyskytují ve formě pasty nebo filmu (ACAF). Anizotropní lepidla mají vazební složku obvykle složenou z termoplastické nebo polymerové pryskyřice. Jako vazební složka se zde častěji využívá termoplastická pryskyřice. [6]

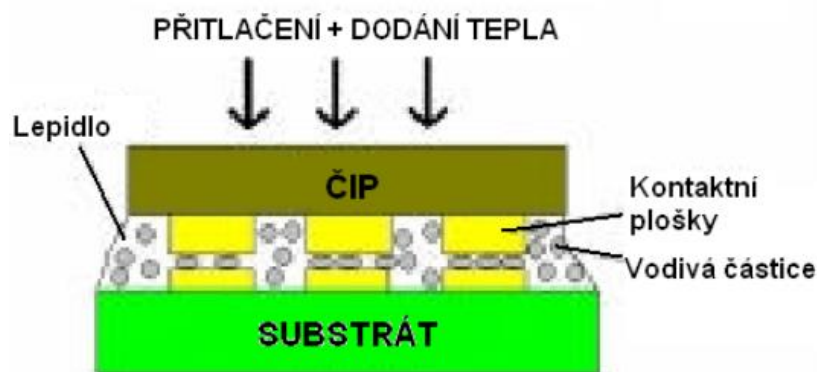
Vodivá složka obsahuje kovové částice ve tvaru kuliček, které jsou z polymeru pokryté vodivou vrstvou (např. stříbro). Koncentrace těchto částic bývá malá (obvykle kolem 25 – 30 %), ale jejich velikost je velká (obvykle kolem 10  $\mu\text{m}$ ). Díky kombinaci nízké koncentrace částic a jejich velikosti se kovové částice dotýkají mezi sebou pouze ve směru přítlaku. Proto jsou lepidla vodivá pouze v jednom směru (směr přítlaku). [3], [6], [71]

- ***Vytvrzování a nanášení ACA***

K vytvrzení anizotropního lepidla se využívá působení tlaku a tepla (nebo UV záření). Tlak použitý při vytvrzování způsobí vytvoření vodivé cesty ve směru přítlaku a vytvoření elektrického propojení. Jakmile se dosáhne elektrického propojení, je vazební složka

vytvrzena chemickou reakcí (iniciovanou např. UV zářením) a teplem. Nevýhodou při používání anizotropního lepidla je fakt, že při vytvrzování musí být současně vyvíjen tlak a teplo (nebo UV záření). [3], [6], [11]

Nanášení anizotropního lepidla lze provést stejně jako u izotropního pomocí tisku (sítotisk, inkoustový tisk, šablonový tisk) nebo dispensingem. [21]



Obr. 7 Princip vytvrzení anizotropního lepidla, převzato z [58].

- ***Aplikace a použití anizotropního lepidla***

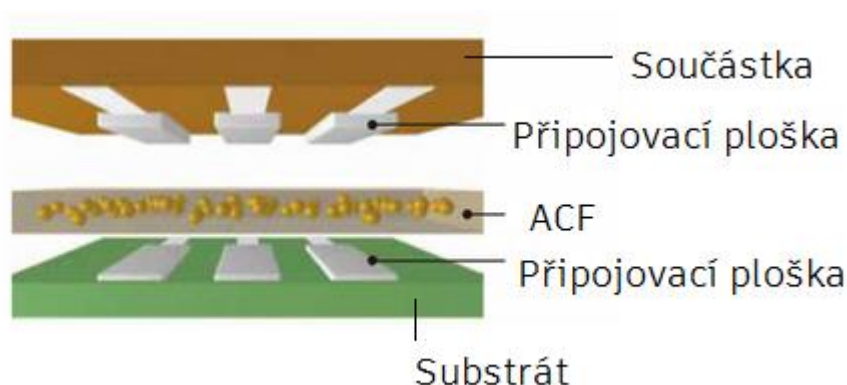
Před aplikací lepidla je nutné nejprve povrch chemicky a mechanicky důkladně očistit. Poté se nanese lepidlo mezi povrchy (vývody osazené součástky a kontaktní plošky substrátu), které mají být spojeny. Lepidlo je možno nanést i mimo vývody vzhledem k jeho vodivosti. Po nanesení lepidla na oba povrchy působí tlak a síla současně, až dojde k vytvrzení lepidla. [3], [6]

Anizotropní lepidla jsou hlavně využívána pro připojení velkého množství součástek s malými roztečemi v pouzdrech. Dále také k připojení ovladačů na LCD displeje nebo ploché panelové displeje OLED. Lze je také využít ke kontaktování čipů, jako např. flip chip nebo TAB. [6], [21], [70]

- ***Fólie (film) z anizotropních lepidel (ACF)***

Pro připojení součástek k základní desce se také mohou použít fólie (film) tvořené z anizotropních vodivých lepidel. Fólie se používají pro montáž integrovaných obvodů s malou roztečí. Princip je takový, že na propojovací desku s připojovacími ploškami je

vložena fólie z elektricky vodivého lepidla. Na fólii jsou přitlačeny součástky a po vytvrzení dojde mezi vývody součástky a ploškami základní desky k propojení. Plnivo může také být jen rozmístěno na místa, která jsou předem definována dle rastru nanášení. Díky tomu vznikají orientované vodivé vrstvy. Tyto vrstvy nám zlepšují elektrické izolační vlastnosti. Podmínka pro kvalitní spoj je, aby součástky měly vývody ve tvaru výstupků s rovnou čelní plochou. V dnešní době jsou využívány častěji než klasická anizotropní lepidla. [3], [15], [16], [58]



Obr. 8 ACF mezi substrátem a součástkou, převzato a upraveno z [86].

### 2.3 Elektricky nevodivá lepidla (NCA)

Elektricky nevodivá lepidla jsou lepidla, které nemají vodivost. Jejich využití je hlavně v montáži, kde slouží k upevnění elektronických součástek k desce plošných spojů jako je například cívka nebo senzor. Elektricky nevodivé lepidlo by mělo být tepelně vodivé, aby mohlo působit jako chladič. I když je lepidlo nevodivé lze i jím vytvořit elektricky vodivý spoj. [3], [17]

- **Složení vazební a vodivé složky**

Vazební složka je u elektricky nevodivých lepidel obvykle tvořena z akrylátové nebo epoxidové pryskyřice. [72]

Vodivá složka neboli plnivo, se u nevodivých lepidel většinou nevyskytuje. Pokud se plnivo užívá, tak ve formě takzvaných nanoplňiv. Tyto nanoplňiva ve formě částic zlata nebo ve formě oxidu křemičitého slouží ke zlepšení spolehlivosti spoje, hlavně ale umožňují snížení vysokého tlaku, který je potřeba při spojování běžnými nevodivými lepidly. [3], [21]

- ***Vytvrzování a nanášení NCA***

Pro vytvrzení elektricky nevodivých lepidel se používá stejně jako u anizotropních lepidel tlak a teplo, UV záření nebo kombinace UV záření, tepla a tlaku. [19]

Nanášení nevodivého lepidla lze provést pomocí tisku (sítotisk, inkoustový tisk, šablonový tisk) nebo dispensingem. [21]

- ***Aplikace použití nevodivého lepidla***

Před aplikací nevodivého lepidla je nutné nejprve povrch, na který se bude lepit, chemicky a mechanicky důkladně očistit. Poté se nanese lepidlo pomocí jedné z metod nanášení. Do naneseného lepidla se osadí součástka a následně se působením současně tlaku a teploty lepidlo vytvrdí. [21]

Primárním účelem nevodivého lepidla je fixace součástky na desku plošných spojů tak, aby bylo možné provést připojení součástky ke kontaktním ploškám na desce. Lze jej také použít pro upevnění na pružných substrátech, jako jsou čipové karty, pro výrobu LCD displejů nebo jako alternativu anizotropního lepidla např. pro flip chip. [3], [17], [18], [21]

Elektricky nevodivá lepidla mohou být také použita pro vytvoření vodivého spoje. Vodivý spoj vznikne přilepením součástky k desce tak, aby se vývody součástky dotýkaly kontaktních plošek na desce a tím vznikl mechanický elektricky vodivý kontakt. Díky vytvrzení lepidla zůstává součástka pevně na místě a nemůže tak dojít k případnému posunutí součástky a zrušení vodivého spojení. Vzhledem k nevodivosti lepidla nemůže dojít ke zkratu mezi dvěma sousedními kontakty zalitými lepidlem. Díky tomu je možné připojovat součástky s velmi malými roztečemi, stejně jako v případě anizotropních lepidel. [3], [21]

- ***Fólie (film) nevodivých lepidlech (NCF)***

Jelikož je vodivost mezi substrátem a součástkou vytvořena pomocí mechanického kontaktu, je schopnost průchodu proudu mezi kontakty při vysokých teplotách a vlhkosti omezena. Aby se při vysokých teplotách zlepšil průchod proudu a nedocházelo k jeho omezení, začaly se do nevodivých lepidel přidávat takzvaná nanoplňiva ve formě částic

zlata, nebo nevodivá plniva jako například oxid křemičitý. Přidáním těchto nanočástic vznikne nová propojovací fólie takzvaná nano-NCF, která umožňuje elektrickou vodivost podél osy z. Na rozdíl od fólií tvořených z anizotropních lepidel, které vyžadují souběžných plniv 1 – 5 % objemu, potřebují tyto fólie pouze 0,1 % objemu souběžných plniv k vodivosti ve směru osy z. Tyto plniva pomáhají i ke zlepšení spolehlivosti spoje, hlavně ale umožňují snížení vysokého tlaku, který je potřeba při spojování běžnými nevodivými lepidly. [21]

### 3 Porovnání lepení a pájení

V této kapitole jsou porovnány jednotlivé metody z hlediska jejich výhod.

- ***Výhody použití lepidel***

Elektricky vodivá lepidla mají oproti pájkám několik výhod. Mezi výhody lze zařadit nepoužívání tavidla, či možnost připojení součástek s menší roztečí. Rozteč vývodů součástek, které lze připojit pomocí lepidel, je až 0,1 mm. To, vzhledem k trendu stále větší miniaturizace součástek, je oproti pájkám jednoznačná výhoda (pomocí pájek lze připojit vývody do rozteče 0,3 mm, pokud je rozteč menší, dochází ke zkratům). Lepidla jsou také oproti pájkám výrazně flexibilnější a tedy vhodnější pro použití na flexibilní substráty na rozdíl od pájek, které zde mohou praskat. Kromě toho lepidla odolávají trhlinám, které jsou způsobené vibracemi a rázy, lépe než pájka. Lepidla mají také větší odolnost vůči teplotním změnám během pracovního procesu. Vodivá lepidla lze použít na téměř všech typech povrchů, jako jsou cín, olovo, stříbro, OSP zlato. Vzhledem k nízké vytvrzovací teplotě lze lepidla použít i pro tepelně citlivé substráty a součástky. Jako další výhoda se jeví možnost použití vodivosti v jednom směru (anizotropní lepidla). Bez lepidel se také nedá obejít u kontaktování LCD displejů, dotykových displejů apod. [1], [6], [73], [21]

- ***Výhody použití pájek***

Pájky jeví výhody oproti lepidlům hlavně ve vodivosti a odolnosti proti vlhku. Vodivost u pájeného spoje je o dva až tři řády vyšší. Pájené spoje také mohou být vystaveny vlhkému prostředí na rozdíl od lepených spojů. Životnost pájeného spoje je větší, než životnost lepeného spoje. Pájky také lépe odolávají nárazům na tuhých substrátech. Cena samotných pájek je také menší. Pájky nejsou také tak náchylné k degradaci při skladování. [21], [15], [58], [73]

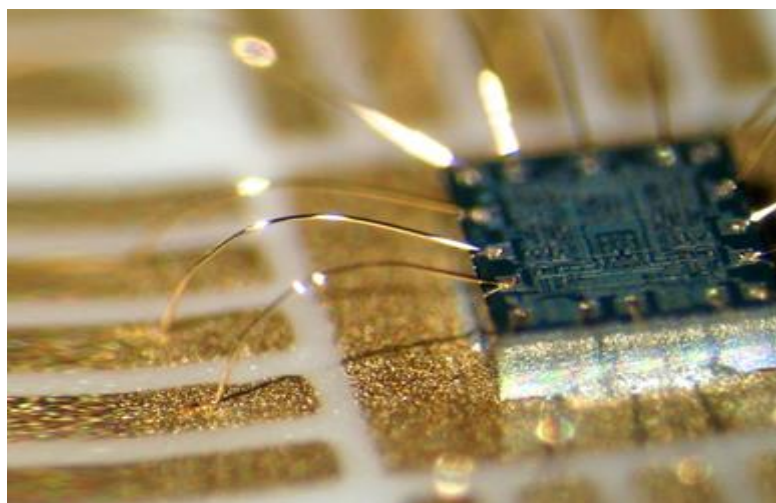
## 4 Bondování

Tato kapitola obsahuje seznámení s technologiemi wire bonding, flip chip a tape automated bonding. Tyto technologie jsou využívány především při procesu pouzdření, lze je ovšem využít i pro připojení nepouzdrženého čipu rovnou k substrátu.

Metoda připojení čipu přímo na substrát (bez předešlého pouzdření) se nazývá COB (chip on board). Jedná se o technologii, kdy čip nebo matrice je přímo připojena k desce plošného spoje namísto pouzdření čipu do samostatného integrovaného obvodu. [62]

### 4.1 Wire bonding

Wire bonding je technika propojení dvou kovových materiálů. Propojení vzniká pomocí kombinace teploty, síly a ultrazvukové energie. Spoj zde vzniká pomocí svařování, tj. oba propojované materiály se taví. Tato technika je často využívána pro tvorbu elektrického propojení mezi polovodičovým čipem a kontaktními ploškami, které mohou být na pouzdře nebo substrátu. Propojení se provede pomocí tenkých vodičů (průměr menší než 50  $\mu\text{m}$ ) tzv. mikrodrátků, které jsou přivařeny na kontaktní plošku pomocí metod kontaktování (kap. 4.1.1). Tyto vodiče mohou být ze zlata, hliníku (s přidáním 1 % křemíku) a v poslední době je využívána také měď. Čip před provedením procesu wire bonding obvykle bývá k substrátu nebo pouzdru připevněn pomocí lepidla nebo pájky. Teploty pro připojení pomocí mikrodrátků se pohybují od 150  $^{\circ}\text{C}$  do 300  $^{\circ}\text{C}$ . [7], [22], [16]

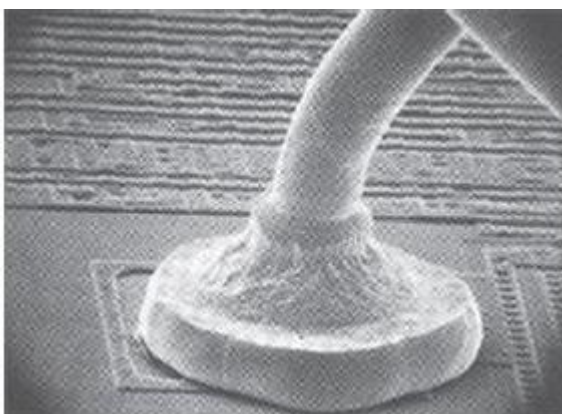


Obr. 9 Ukázka propojení čipu a substrátu pomocí wire bonding, převzato z [87].

U bondování existují dva druhy provedení spoje [7]:

- *kuličkový*
  - *hranový*
- 
- *kuličkový spoj*

Na drátku je vytvořena kulička pomocí elektrického výboje. Poté se pomocí kontaktovací hlavy tato kulička přivaří na kontaktovací plošku. Dále se hlava přesune nad další kontaktovací plošku a opět vytvoří kontakt. Tímto se z drátku vytvoří smyčka, poté skřípec utrhne zbytek drátku za vzniklými spoji. Vzniklý spoj je zobrazen na Obr. 10. [1], [16]

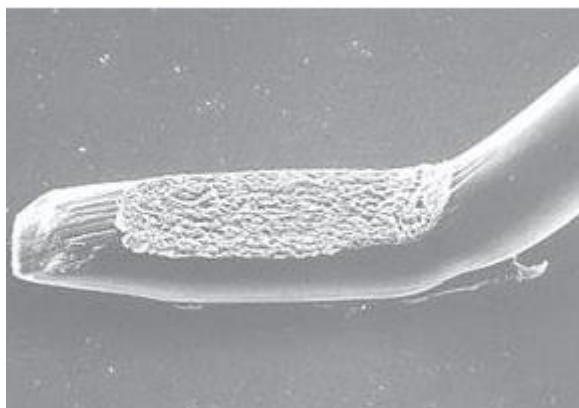


Obr. 10 Zvětšený pohled na vzniklý kuličkový spoj, převzato z [7].

- *hranový spoj*

Tento spoj vzniká procházením drátku kontaktovací hlavou, ve které se vysune na potřebnou délku a skřípec je sevřen. Kontaktovacím klínem se drátek přimáčkne na kontaktovací plošku a skřípec povolí. Tím se vytvoří kontakt hranou hlavy. Poté hlava přejede nad další plošku a sjede dolů. Tím se vytvoří další kontakt a zároveň smyčka z mikrodrátku. Zbytek drátku se utrhne sevřením skřípce a odjetím kontaktovací hlavy. Výsledný hranový spoj je zobrazen na obrázku (Obr. 11). [1], [16]





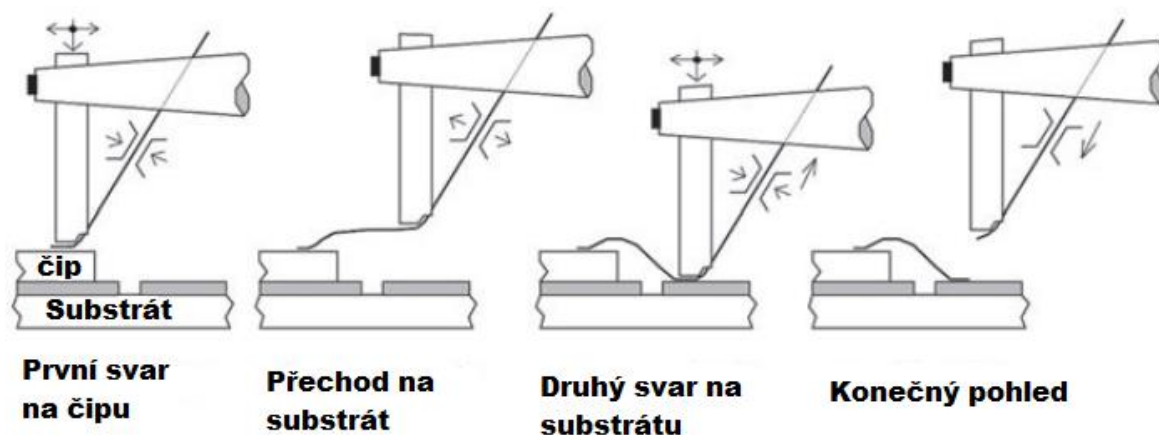
Obr. 11 Zvětšený pohled na vzniklý hranový spoj, převzato z [7].

#### 4.1.1 Metody připojení (kontaktování) mikrodrátků

Mikrodrátky můžeme připojit třemi základními metodami [16]:

- *Kontaktování ultrazvukem*
- *Kontaktování termokompresí*
- *Termosonické kontaktování*
  
- *Kontaktování ultrazvukem*

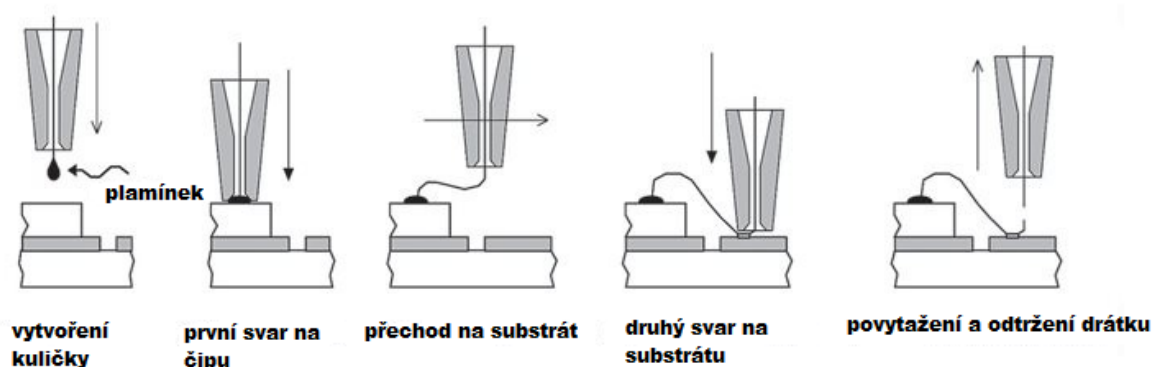
Kontaktování ultrazvukem je technologický postup využívající smykového tření, vyvolaného ultrazvukem. Ultrazvuk, který je vytvářen pomocí ultrazvukového generátoru a akustického transformátoru, rozkmitá kontaktní hlavu přitlačující drátek na kontaktní místo (plošku). Rozkmitaný hrot rozkmitá drátek a vznikne tření, které vyvolá teplo potřebné k vytvoření spoje mezi drátkem a kontaktní ploškou. V místě spoje dochází k svaření. Kontaktní hlava složená z piezoelektrického měniče kmitá kmitočtem od 30 kHz do 120 kHz. Doba potřebná pro vytvoření spoje je kolem 25 ms. [7], [16], [23]



Obr. 12 Postup při kontaktování ultrazvukem, převzato z [7].

- **Kontaktování termokompresí**

Kontaktování termokompresí je technologický postup, který využívá ke kontaktování působení tlaku a teploty. Spojení je zde vytvořeno mezi mikrodrátkem a připojovacími ploškami čipu. Připojovaný čip a jeho připojovací plošky jsou ohřáty na teplotu 200 – 250 °C. Vzhledem k nízké teplotě by ale nedošlo ke svaření mikrodrátku k připojovacím ploškám čipu. Aby vznikl spoj (svar) je potřeba přidat energii ve formě tlaku. Tlak společně s teplotou vyvolá difúzi mezi materiály a dojde k prolínání atomů mezi oběma materiály a k vytvoření spoje. V tomto případě by měl být připojován drátek ze zlata, aby nedocházelo k oxidaci a vytváření intermetalických slitin. Doba potřebná k vytvoření spoje je 1 s. [7], [16], [23]



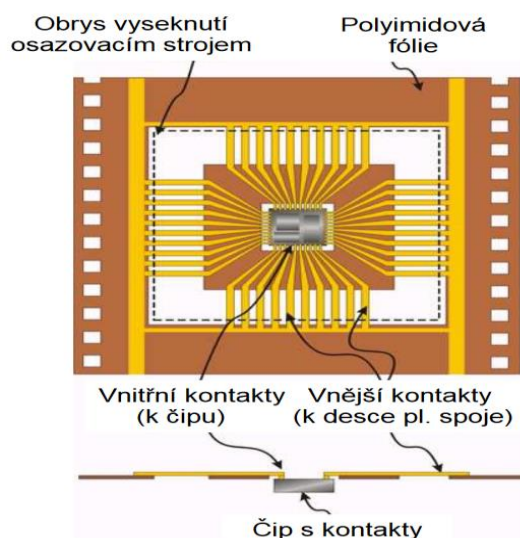
Obr. 13 Postup při kontaktování termokompresí, převzato z [7].

- **Kontaktování termosonické**

Jedná se o kombinaci kontaktování ultrazvukem a termokompresí. Při tomto kontaktování je čip a jeho kontaktovací plošky zahříván stejně jako u termokompresí a zároveň je připojovací drátek rozkmitáván stejně jako u kontaktování ultrazvukem. K vytvoření spoje (svaru) je potřeba teplota 100 – 200 °C a čas 5 – 20 ms s podmínkou, že působící hmotnost na spoj musí být okolo 100 g. Tímto kontaktováním je možné připojit mikrodrátky ze zlata, hliníku i mědi. [7], [16], [23]

## 4.2 Tape automated bonding

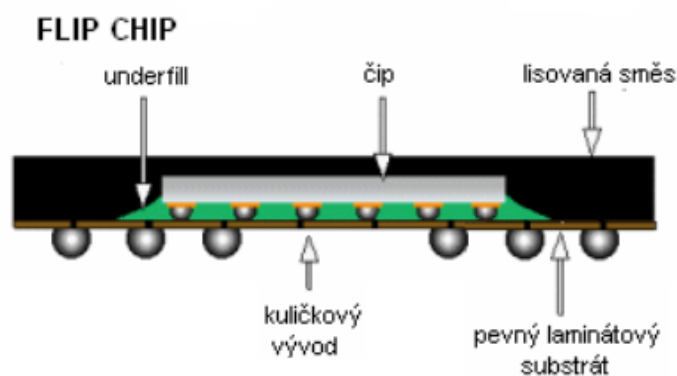
Tape automated bonding (TAB) je proces, při kterém dochází k připojení čipů na ohebné substráty (polyamidové fólie). Drátky jsou zde nahrazeny kovovými proužky na plastové fólii. Na ohebný substrát se vytvoří kontakty (kovové proužky) pro připojení čipu, které jsou rozšířeny také na kontakty, kterými se poté bude obvod připojovat k desce plošného spoje. Kontakty vzniknou pokrytím fólie mědí a následným vyleptáním. Kovové proužky na fólii mohou být k čipu připojeny společným pájením zlata a cínu nebo termokompresí. Následně je obvod, i s čipem (který je přilepen k fólii lepidlem), s rozšířenými kontakty vystřižen pomocí osazovacího stroje. Čip je poté kontaktován připájením nebo pomocí anizotropního lepidla (fólie) k desce plošného spoje a zalit epoxidem. [23], [32], [33], [34], [58]



Obr. 14 Princip připojení pomocí TAB, převzato z [23].

### 4.3 Flip-chip

U této technologie se propojují vývody holého čipu na substrát nebo do pouzdra. Čip má svoji aktivní stranu otočenou směrem k substrátu na rozdíl od jiných metod kontaktování (wire bonding, TAB). Vývody vytvořené na kontaktech u čipu mohou být kuličkové nebo sloupcové a jsou obvykle z pájky. Roztavením těchto vývodů dojde k elektrickému propojení se substrátem. Kontakt mezi substrátem a čipem může být proveden také pomocí vodivého lepidla (obvykle fólie s anizotropní vodivostí), nevodivým lepidlem nebo termokompresním spojením. K fixaci nezapouzdřeného čipu přímo na substrát slouží dielektrický výplňový organický materiál nazývaný underfill, který zároveň snižuje namáhání spojů. Pokud nezapouzdřený čip bude kontaktován přímo na nosný substrát, tak se jedná o techniku flip chip on board (FCOB). Jako substráty pro Flip chip se používají keramické nebo organické substráty. [34], [23], [58]



Obr. 15 Technologie flip chip, převzato a upraveno z [34].

## 5 Kontaktování pomocí inkoustu

V této kapitole je seznámení s technologií Aerosol Jet® a její možnost využití při kontaktování součástky.

### 5.1 Aerosol Jet®

Aerosol Jet® je aditivní, selektivní, depoziční technika, kterou lze vytvořit a realizovat součástky (například tranzistory), tištěné vodivé cesty, jemné vodivé motivy, nebo integraci pasivních součástek, aniž by bylo potřeba dalších příprav masek nebo předloh. Také lze realizovat miniaturizaci elektronických systémů, či nanášet nanouhlíkové struktury a bioaktivní obrazce na téměř všechny využívané materiály. [46], [44]

Vzhledem k tomu, že se jedná o nízkoteplotní proces, teplota zpracování se pohybuje pod 150 °C, lze tuto technologii používat i na substrátech a komponentech, které jsou tepelně neodolné. [45], [47]

- ***Princip nanášení inkoustu Aerosol Jet®***

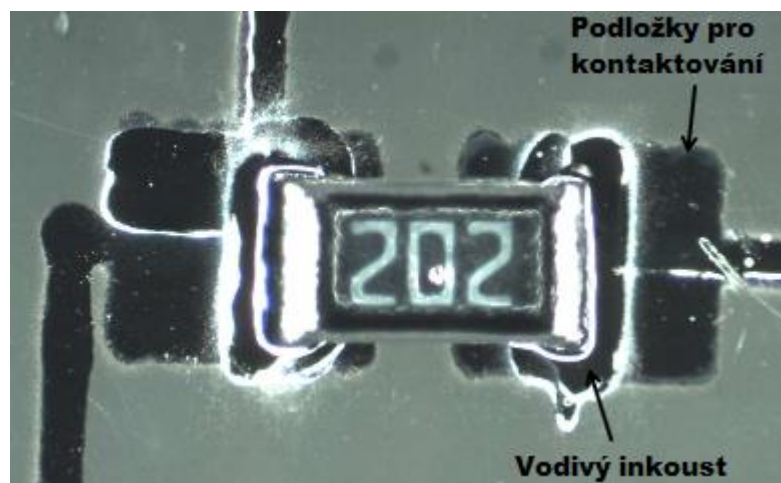
Při technologii Aerosol Jet® dochází k bezkontaktnímu nanášení inkoustu na substrát. Nanášený inkoust je ve formě aerosolu (směs malých tekutých částic v plynu). Pro nanášení a přenos aerosolu na substrát slouží nosný plyn (dusík). Inkoust je umístěn do rozprašovače (tzv. atomizéru), kde dojde k vytvoření aerosolu. Poté proud dusíku přeneše inkoust do nanášecí hlavy, ve které je tryska. Z trysky je aerosolový proud, prstencově obklopený usměrňovacím plynem (opět využit dusík), bezkontaktně nanášen na substrát. Tisk pomocí Aerosol Jet® je velice přesný a šířka tisknutého vodivého motivu může být od 10 μm. [44], [45]

Technologii Aerosol Jet® lze použít pro vytvoření vícevrstvých obvodů a pasivních komponent střídavým tiskem vodivých čar a dielektrika přes sebe. Jelikož je možné být při tisku od substrátu oproti jiným technologiím poměrně daleko (cca 1 cm), je zde možnost tuto technologii použít i pro nanášení inkoustu na zakřivené povrchy nebo 3D substráty. Samozřejmě je možnost rozšířit standardní 2D polohování na víceosé systémy a tím ještě podstatně posunout možnosti tisku i na velmi složité 3D povrchy. [44], [47]

- **Kontaktování součástek pomocí nanášení inkoustu v Aerosol Jet®**

Kontaktování součástek je podobné jako vytváření vícevrstevných pasivních komponent. Proces probíhá vytvořením první vrstvy tím, že se na substrát vytisknou podložky pro kontaktování společně s vodivými motivy. Druhá vrstva se vytvoří pomocí vodivého inkoustu natištěného přes podložky. Poté je součástka umístěna (u velkých součástek může být mezi substrátem a součástkou vrstva lepidla pro lepší fixaci součástky) na podložky, aby mokrá inkoust smáčel vodivé kontakty součástky. Vodivý motiv a kontaktování součástky (v dnešní době většinou SMD) lze také udělat v jednom kroku, kdy je součástka připevněna pomocí lepidla a inkoust je tištěn až k jejím vývodům, které smáčí. K vytvoření spoje dojde vytvrzením inkoustu. [47], [48]

Mechanická pevnost takto vytvořeného spoje je srovnatelná s vytvořeným spojem pomocí vodivého lepidla. [60]



Obr. 16 Rezistor připojený pomocí technologie Aerosol Jet®, Převzato a upraveno z [47].

## 6 Substráty

Účelem substrátů je nést součástky, umožnit jejich elektrické propojení a zároveň odvést ztrátové teplo. Substráty mohou být pevné, ohebné (flexibilní), nebo textilní (smart textilie). V této kapitole jsou popsány všechny 3 druhy substrátů a zároveň jsou zde uvedeny možnosti jejich kontaktování. [1]

### 6.1 Tuhé substráty

Tuhé substráty jsou využívány především v místech, kde je potřeba, aby si deska plošného spoje zachovala svůj tvar po celou dobu životnosti. Jedná se například o stolní počítače nebo televizory. [52], [57]

Tuhé substráty můžeme rozdělit na: organické substráty s výztuží, kompozitové substráty nebo anorganické substráty. [53]

- ***Organické substráty s výztuží, kompozitové substráty***

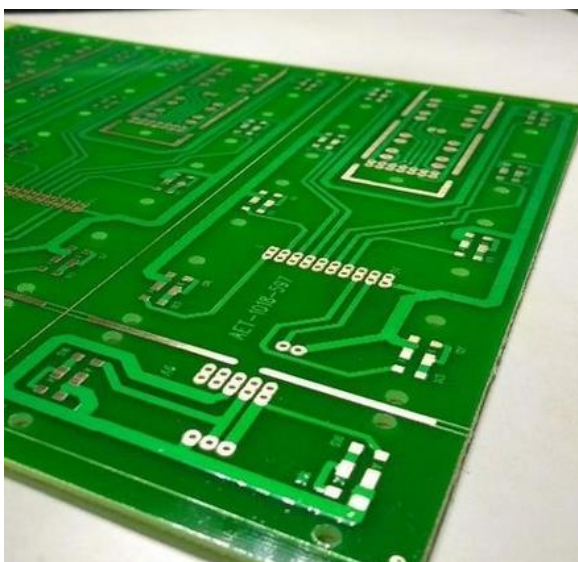
Organické substráty s výztuží se nejčastěji skládají z fenolické nebo epoxidové pryskyřice a obsahují výztuž. Právě výztuž určuje mechanické vlastnosti substrátu. Může být vytvořena ze skelné tkaniny, papíru či bavlny. Jako pojivo se zde využívá fenolformaldehydová nebo epoxidová pryskyřice. [53]

Mezi organické substráty patří například FR-1, FR-2, FR-3 a FR-4 (FR je označení nehořlavého materiálu dle organizace NEMA). Substráty s označením FR-1, FR-2, FR-3 mají jako výztuž papír a jsou využívány pro jednovrstvou DPS. FR-4 má jako výztuž použitou skelnou tkaninu (spřádaný sklotextil) a lze jej využít pro oboustrannou DPS. [53], [52]

Právě FR-4 (Obr. 17) je dnes nejvyužívanější substrát pro DPS. Je to hlavně z důvodu jeho levné výroby a univerzálnosti. Mimo jiné jej lze metalizovat a snadno do něj vytvářet otvory pro součástky. Dále je lehký a odolný proti vlhkosti a má potřebnou tepelnou odolnost pro pájení (teplota pájitelnosti je až 260 °C). Není však vhodnou volbou pro

vysokofrekvenční tištěné obvody. Teplota skelného přechodu je od 115 °C do 200 °C. [52], [54], [59]

Dalšími využívanými substráty jsou kompozitové substráty. Ty využívají výhody papíru (levné pořizovací náklady) a skla (rozměrová stabilita, elektrické vlastnosti). V některých aplikacích mohou nahradit FR-4. Mezi tyto substráty patří například CEM-1 a CEM-3. CEM-1 je vyroben z celulóзовého papíru, který je vložen mezi dvě skelné tkaniny. CEM-1 se používá pro jednostranné DPS, vzhledem k nemožnosti pokovení otvorů. Lze ho považovat za alternativu k FR-1, ale nemá takovou mechanickou odolnost. CEM-3 se používá v oboustranných DPS. Je levnější než FR-4. Skládá se ze skelné rohože a skloepoxidového prepregu. Může se využít jako náhrada za FR-4. [52], [53]



Obr. 17 Substrát FR-4, převzato z [55].

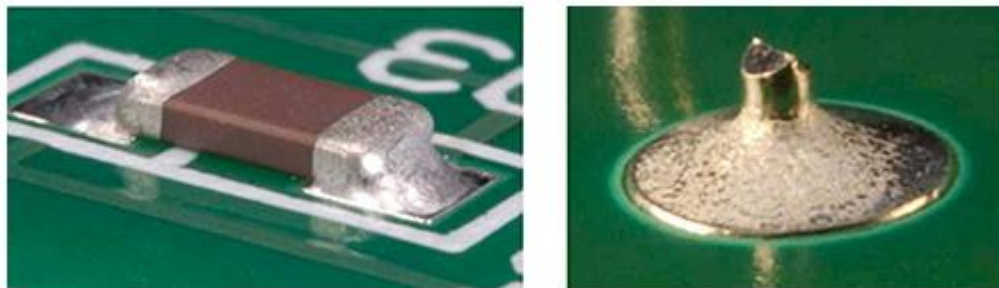
- **Anorganické substráty**

Anorganické substráty mají oproti organickým substrátům vyšší tepelnou odolnost, jsou chemicky odolné, drží si tvar (rozměry). Také mají nižší koeficient teplotní roztažnosti. Anorganické substráty jsou využívány v technologii tenkých a tlustých vrstev. Mezi ně patří např. keramické substráty. [53]



### 6.1.1 Kontaktování tuhých substrátů

Kontaktování součástek k tuhým substrátům je možné provést všemi metodami kontaktování (lepením, inkoustem, pájením, svařováním). Vzhledem k tomu, že zde není ani jedna technologie limitována teplotou, která by zničila substrát, dle [70] je u keramických substrátů využíváno častěji lepení před pájením.



Obr. 18 Pájený spoj na FR-4, vlevo SMD, vpravo THD, převzato z [83].



Obr. 19 Spoj vytvořený lepením, převzato z [84].

## 6.2 Flexibilní substráty

Flexibilní (ohebné) substráty jsou vyráběny podobně, jako jsou vyráběny neohebné substráty. Rozdíl je ve výztuži, kterou ohebné substráty neobsahují. Flexibilní substráty by měly mít vlastnosti, jako jsou rozměrová stabilita, tepelná stabilita a nízký koeficient tepelné roztažnosti. Jako nevýhoda se u nich jeví problematické osazení součástek a pokovení otvorů. Výhoda je ovšem v jejich ohebnosti, některé substráty lze ohnout až milionkrát. Flexibilní substráty mohou mít tloušťku už od 12  $\mu\text{m}$ . [40], [42]

Uplatnění flexibilních substrátů je nejčastěji pro malá zařízení a pracovní prostředí, ve kterém se objevují vlivy jako vibrace a vysoká úroveň tepla. Jedná se např. o automobilový průmysl či farmaceutický průmysl. [57]

Flexibilní substráty lze rozdělit do čtyř skupin: tenké sklo, kovové fólie, plastové filmy, vláknenné materiály (papír). [41]

- **Plastové flexibilní substráty**

Plastové substráty ve formě plastové fólie jsou nejčastěji používanými substráty ve flexibilní elektronice. Pro výrobu plastových substrátů se nejčastěji používají materiály: polyester (PES), polyethyltereftalát (PET), polyimid (PI), polyetylen-naftalen (PEN), polykarbonát (PC). Jsou také velice flexibilní, levné a umožňují zpracování válcováním. Jejich teplotní a rozměrová stabilita však není tak vysoká jako u skleněných substrátů. Jsou většinou také tepelně neodolné. Výjimku tvoří například Kapton. Kaptonová fólie je jedna z teplotně nejodolnějších plastových fólií, svojí teplotní odolností převyšuje i některé klasické substráty. Mezi používané plastové substráty (plastové fólie) patří například: Melinex, Teonex a výše zmíněný Kapton. Tepelná odolnost jednotlivých substrátů je znázorněna v následující tabulce (Tab. 3). [39], [40], [41], [51]

Tab. 3 Přehled plastových substrátů a jejich teplota skelného přechodu

Fólie (název substrátu)	Teplota skelného přechodu T <sub>g</sub> [°C]
PET (Melinex)	78
PEN (Teonex)	121
PC (Lexan)	150
PES (Sumilite)	223
PI (Kapton)	410

- **Skleněné flexibilní substráty**

Jsou to substráty ve formě tenké skleněné desky (fólie). Používají se v technologii zobrazovacích zařízení. Skleněné substráty mají tloušťku obvykle 100 μm. V případě skleněné fólie to může být i 30 μm při výrobě skla metodou tažení. Substráty vyrobené ze skla mají několik výhod: velká optická propustnost, teplotní a rozměrová stabilita, hladký povrch, nepropustnost vůči kyslíku a vodě, jsou odolné teplotám do 600 °C a další. Skleněné flexibilní substráty jsou ovšem také velmi křehké. [39]

- **Kovové flexibilní substráty**

Jedná se o kovové fólie s tloušťkou menší než 125 μm. Tyto substráty se mohou využít pro reflexivní displeje, které nepotřebují průhledný podklad (substrát). Nejčastější materiál používaný pro výrobu kovových substrátů je nerezová ocel. Tato ocel má velmi vysokou odolnost vůči korozi a lze ji využít i při procesech s teplotou až 1000 °C. Jako další materiály pro výrobu fólie mohou být použity měď nebo titan. [39], [41]

Pro kovové substráty obecně platí, že jsou rozměrově stabilní, tepelně odolné, mají odolnost proti rozpouštědlům a představují bariéru proti průniku vlhkosti a kyslíku. Mohou také sloužit jako chladič. Jelikož jsou kovové substráty elektricky vodivé, tak je potřeba je pro některé aplikace potáhnout izolační vrstvou, aby nedošlo ke zkratu. [39]

- ***Papírové flexibilní substráty***

V dnešní době je možnost použít jako substrát papír. Vzhledem k tomu, že papír je lehký, flexibilní, recyklovatelný a levný, je použití papíru ve flexibilní elektronice stále častější. Jako substráty lze zde použít natírané papíry s primer vrstvou nebo takzvané „Syntetické papíry“ jako jsou: Pretex, Synaps, Tyvek. [43], [51]

### **6.2.1 Tištěná elektronika**

Tištěná elektronika je druh elektroniky, ve které je elektronika (součástky, vodivé spoje) vytvořena pomocí různých technologií tisku na různé substráty (například flexibilní substráty). Jako součástky zde mohou být tisknuty tranzistory, baterie, LED diody, paměti, senzory a jiné. Součástky nebo spoje jsou tisknuty na substrát. Substrát, na který se tiskne, může být vytvořen z mnoha materiálů. Ty materiály mohou být, jak už bylo zmíněno, ve formě papíru, fólie, plastu a skla. [38]

Tisk vodivých spojů na substrát lze přirovnat k obyčejnému tisku inkoustem v tiskárně. Inkoust pro tisk vodivých čar získá vodivost tím, že obsahuje malé částice vodivých materiálů (např. stříbro). Jinak krom odlišné hlavice je tisk vodivého inkoustu stejný jako tisk klasického inkoustu pomocí tiskárny. [38]

- ***Tisk součástek v tištěné elektronice***

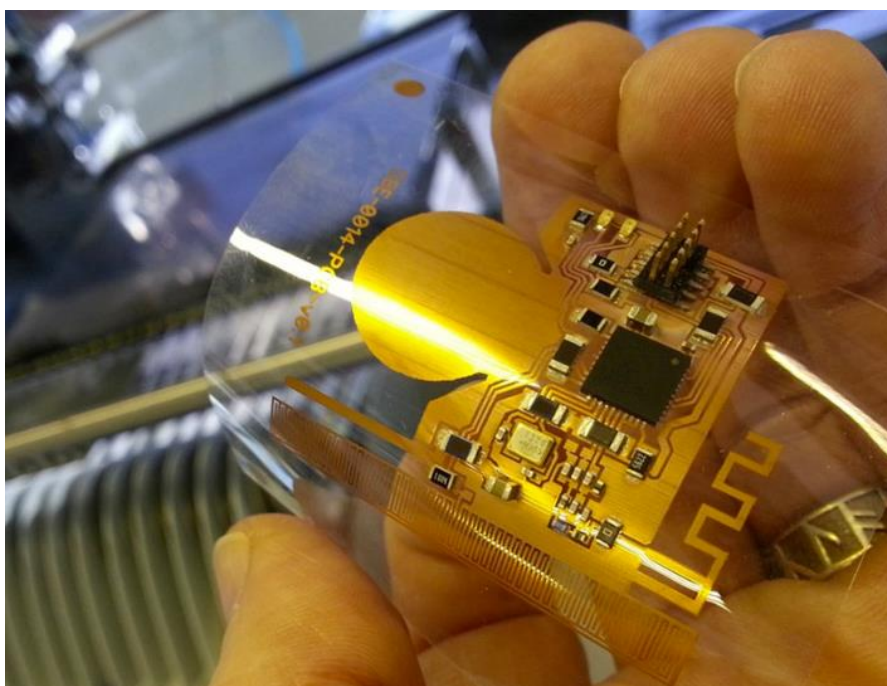
Při tisku součástek je použita organická elektronika. Organická elektronika používá materiály na bázi uhlíku, díky čemuž není potřeba při výrobě použití vysokých teplot. Materiály na bázi uhlíku také umožňují tisknout součástky na materiály jako je papír, fólie, plast, na rozdíl od součástek na bázi křemíku. Tisk součástek probíhá tisknutím jednotlivých vrstev materiálu přes sebe. Aby vznikla požadovaná součástka, jsou jednotlivé vrstvy oddělené izolačními vrstvami. [38]

Postupů pro vytvoření tištěné elektroniky je několik. Mezi postupy patří: sítotisk, flexotisk, hlubotisk, inkjet, ofset a Aerosol Jet® (popsán v kapitole 5). Tyto postupy jsou také velmi levné, a proto i využití pro tištěnou elektroniku je velmi vhodné. [41]

### 6.2.2 Hybridní elektronika

Hybridní elektronika je druh elektroniky, ve které je vytvořena kombinace klasické křemíkové elektroniky spolu s tištěnou elektronikou. Výhoda hybridní elektroniky je tedy v možnosti vytvořit relativně složitý systém z křemíkových integrovaných obvodů spolu s tištěnými senzory na flexibilním substrátu. [41], [49]

U hybridní elektroniky lze obecně říci, že snímače a velkoplošné senzory jsou vytvořeny pomocí tištěné elektroniky, zatímco například vysoce výkonné výpočetní obvody jsou realizovány pomocí SMD součástek (integrovaný obvod). [49]



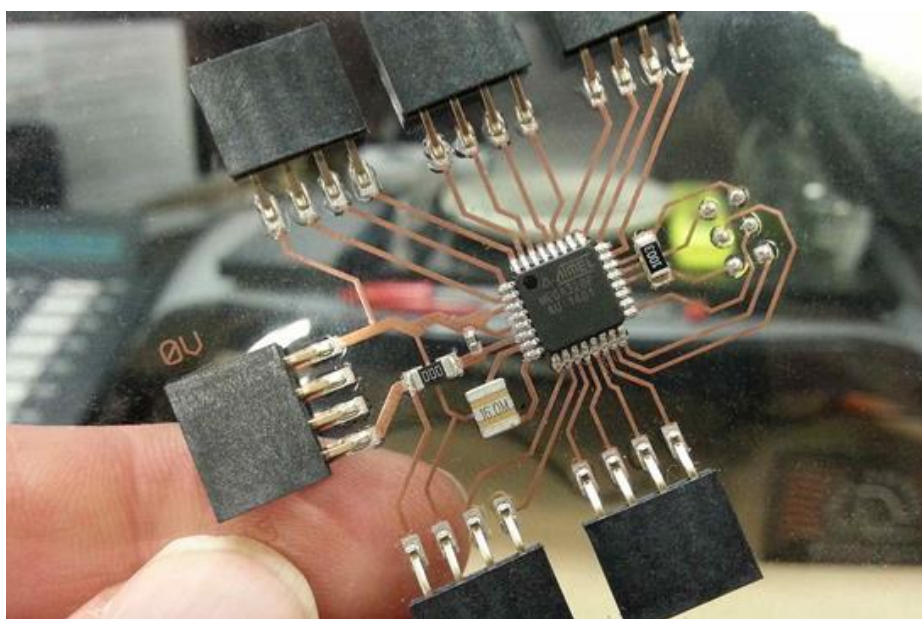
Obr. 20 Ukázka hybridní elektroniky, převzato z [50].

### 6.2.3 Kontaktování flexibilních substrátů

V této kapitole jsou popsány možnosti využití jednotlivých kontaktačních technologií na flexibilní substráty. Vzhledem k nízké tepelné odolnosti některých flexibilních substrátů a taktéž nízké pružnosti pájených spojů je využíváno ke kontaktování spíše lepení lepidly než pájení.

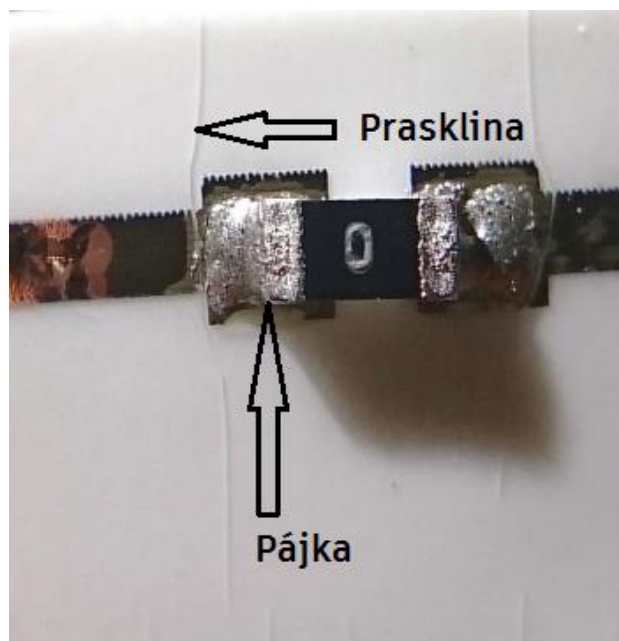
- ***Pájení na flexibilní substráty***

Pájení na flexibilní substráty lze i přes vysoké teploty tavení většiny bezolovnatých pájek také využít. Nejvyužívanější metoda pájení na flexibilní substráty je metoda pájení přetavením. Při použití pájení je důležité kontrolovat, zda flexibilní substrát má dostatečnou tepelnou odolnost pro využití této technologie. Pájený spoj by měl vznikat pokud možno co nejdále od místa ohybu. Využívají se zde bezolovnaté pájky s obsahem bizmutu. Jedná se například o pájku Bi-Sn (42 % Sn, 58 % Bi). Tato pájka začíná přecházet do tekutého stavu už od 140 °C. [85], [61], [67]



Obr. 21 SMD připájené na flexibilní substrát, převzato z [61].

Pájení lze využít i na papírový substrát. Ovšem z důvodu různé tepelné roztažnosti papíru a pájky dochází k častému výskytu trhlin v místech nanesení pájky a ztrátě vodivosti. Ztráta vodivosti je způsobena trhlinami, které přerušují vytvořené vodivé cesty při ohybu papíru (Obr. 22). [85]



Obr. 22 Papírový substrát s připájenými SMD součástkami a vytvořenými trhlinami, převzato a upraveno z [85].

- **Lepení na flexibilní substráty**

Na flexibilní substráty se jako technologie kontaktování také využívá lepení lepidly. Lepidla zde využívaná mohou být elektricky vodivá (ECA) i elektricky nevodivá (NCA). Dle [69] je mechanická odolnost obou typů lepidel stejná. Avšak při porovnání elektrického odporu obou lepidel má NCA elektrický odpor spoje výrazně lepší než spoj vytvořený pomocí ECA.

- **Svařování ve flexibilních substrátech**

Jako proces svařování zde lze využít termosonické svařování (popsáno v kapitole 4.1 wire bonding). Tohoto svařování se využívá například pro plastový PI substrát. Pro zlepšení pevnosti spoje a snížení teploty svařování se využívá čištění substrátu plazmou. [56]

### 6.3 Smart textilie

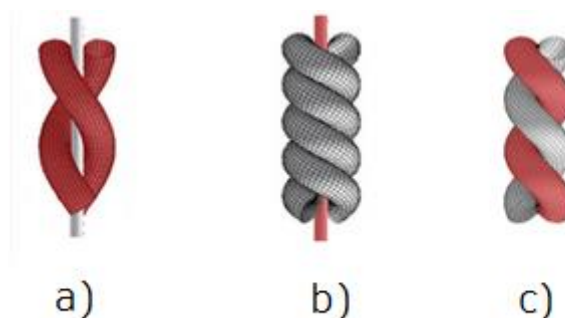
Smart nebo také inteligentní textilie jsou textilní výrobky jako např. vlákna nebo příze s tkanými, netkanými nebo pletenými strukturami, které dokáží zachytit a reagovat na podněty od prostředí či uživatele. Inteligentní textilie lze rozdělit na pasivní, aktivní a velmi inteligentní. Pasivní inteligentní textilie jsou tvořeny senzory a jsou tedy schopny

zachytit podněty okolního prostředí, ale nedokáží na ně reagovat. Aktivní inteligentní textilie obsahují jak senzory, tak akční členy a díky tomu jsou schopny zachytit podněty okolí a reagovat na ně. Velmi inteligentní textilie obsahují senzory, akční člen a řídicí jednotku. Jsou schopné okolní podněty vnímat, reagovat na ně a také přizpůsobit své chování těmto podnětům. [74], [75]

Vodivé cesty na inteligentních textiliích mohou být vytvořeny např. pomocí vodivých přízí integrovaných do textilií nebo sítotiskem. Příze se obvykle skládají z vodivých kovových vláken a nevodivých vláken. Nevodivá vlákna jsou zde z důvodu zachování pružnosti příze. [76], [75]

Vodivé příze (Obr. 23) lze rozdělit na příze obalené kovem, příze s kovovým jádrem a kovové příze. Příze obalená kovem se skládá z nevodivého vlákna, které je obaleno jedním nebo více kovovými drátky. Příze s kovovým jádrem se skládá z kovového drátku obaleného nevodivými vlákny. Kovová příze se skládá z kovových vláken, vyrobených tažením, která jsou zpracována jako příze. Vytvoření vodivých cest pomocí příze se provádí vyšíváním, tkaním nebo pletením. [76], [77]

Sítotisk na vytvoření vodivé cesty zde funguje na stejném principu jako sítotisk na textilie, pouze místo barev se zde využívá vodivá pasta. [75]



Obr. 23 Vodivé příze (červeně označen vodivý drátek), a) obalené kovem, b) s kovovým jádrem, c) kovová příze, převzato a upraveno z [76].

### 6.3.1 Kontaktování inteligentních textilií

Kontaktování inteligentních textilií lze provést pájením, svařováním, textilním kontaktováním nebo lepením. Hlavní požadavek na spoje vytvořené na textiliích je ohebnost

a odolnost proti přirozenému opotřebení a čištění. V dnešní době se zkouší experimentovat také s 3D tiskem jako metodou pro kontaktování. [76], [78], [79]

- ***Pájení v inteligentních textiliích***

Při kontaktování textilií pomocí pájení může dojít k propálení textilie, jelikož většina bezolovnatých pájek má moc vysokou tavící teplotu (např. 217 °C). Aby nedošlo k propálení textilie, je možné pájet pouze na vodivé příze (přímo na kovové vlákno z mědi) nebo použít pájky Bi-Sn a Bi-Sn-Ag (teploty tavení už od 140 °C). Ovšem tyto pájky jsou také křehké. Aby byl pájený spoj odolnější, tak se může zalít epoxidovou pryskyřicí. [75] [78]



Obr. 24 Měděné vlákno připojené k součástce pájením, převzato z [75].

- ***Svařování v inteligentních textiliích***

Jako svařovací proces se při kontaktování textilií využívá např. třecí svařování. Tento proces je podobný ultrazvukovému svařování, takže i při něm se využívá tření mezi dvěma vodiči tkaných v textiliích. Oproti ultrazvukovému svařování se ale liší frekvencí. Při třecím svařování je využívána frekvence 20 kHz. Toto svařování má na rozdíl třeba od tepelného svařování výhodu koncentrace tepla pouze ve tvořeném spoji, takže nedochází k poškození okolní textilie, proto ho lze využít i v inteligentních textiliích. [80]

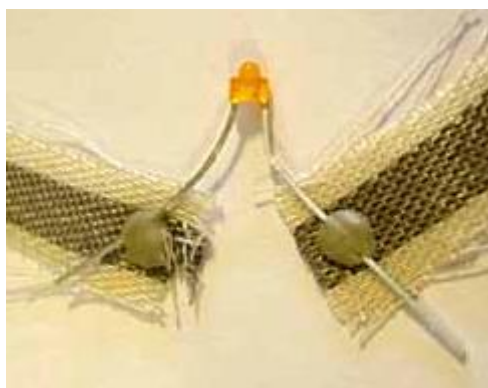
Jako další svařovací proces může být použit proces svařování laserem. Laser je zaměřen na polymerní nebo kovovou část textilie. Tyto části se vlivem záření laseru roztaví a následně spojí. [81]



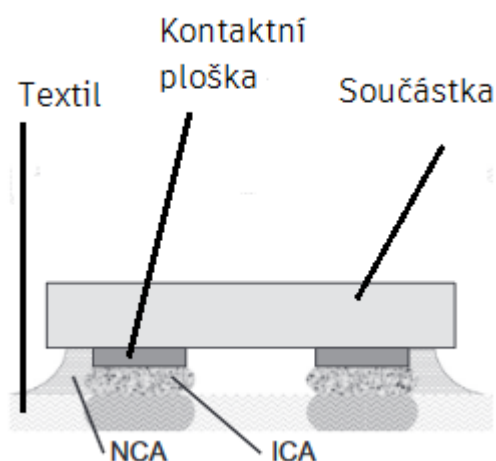
- **Lepení v inteligentních textiliích**

Lepidla v inteligentních textiliích mohou být použita jak pro lepení dvou textilií, tak také k lepení textilie k flexibilnímu substrátu, či k připojování součástek přímo na textilií. [81]

Obvykle se používají 3 metody kontaktování SMD součástek na textilie pomocí lepidel. Může se použít nevodivé lepidlo, kde dochází k vytvoření vodivého spoje mechanickým kontaktem. Využívá se také izotropní lepidlo nebo kombinace izotropního lepidla a nevodivého lepidla. Kombinací obou lepidel (Obr. 25) se dosáhne větší mechanické pevnosti a elektrické vodivosti než při použití pouze jednoho lepidla. [82]



Obr. 25 Dioda přilepená vodivým lepidlem k textilii, převzato z [81].

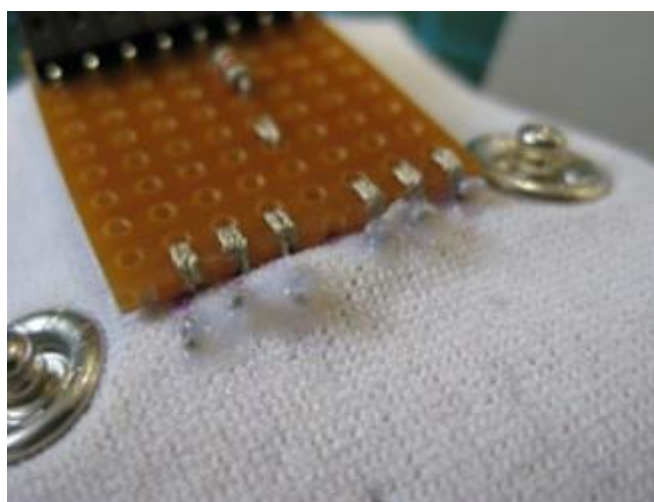


Obr. 26 Kombinace NCA a ICA při lepení na textil, převzato a upraveno z [82].

- ***Textilní kontaktování v inteligentních textiliích***

Při textilním kontaktování ve většině případů dochází k vytvoření různých druhů švů pomocí šití. Tuto metodu lze uskutečnit díky vodivým přízím. Na rozdíl od pájení, svařování a jiných technik, šité spoje nemají tak dobrou vodivost, ale zase mají vyšší mechanickou odolnost. Ke zlepšení vodivosti a snížení odporu spoje lze na vytvořený spoj ještě využít pájku, ale pouze u textilií, kde nedojde k poškození. [78], [75]

Jako nejspolehlivější metoda šití se jeví kontaktování vodivým závitem. Při kontaktování vodivým závitem dochází ke spojení tkaniny se součástkou. Vzniklý spoj je kvůli mechanické ochraně poté dobré ještě zalít lepidlem. Mezi další metody patří například vodivý suchý zip nebo kontaktování pomocí magnetů. [75], [82]



Obr. 27 Vodivý závit zalitý lepidlem, převzato z [75].

- ***3D tisk v inteligentních textiliích***

Tento způsob se jeví jako alternativa k pájení a lepení při kontaktování SMD součástek k textiliím. Jelikož pájení ani lepení není spolehlivé. Při této metodě dojde k vytisknutí pouzdra na textilií s předem danými rozměry. Pouzdro (zobrazeno na Obr. 28) je tisknuto z vodivého materiálu tak, aby se do něj poté dala usadit SMD součástka. Tato metoda ovšem nenabízí lepší spolehlivost, nežli metody pájení či lepení, a zůstává předmětem dalšího zkoumání. [79]



Obr. 28 Vytisknuté pouzdro s vloženou součástkou (vpravo) a bez součástky (vlevo), převzato z [79].

## 7 Zhodnocení jednotlivých technologií

Při zhodnocení jednotlivých technologií kontaktování je nutné brát ohled na to, jaký typ substrátu a v jakém prostředí bude daná technologie využita. Dalším důležitým faktorem může být teplota, při které se samotná technologie kontaktování provádí. Jedná se například o teplotu tavení pájky.

Technologie pájení je nejčastěji využívaným procesem pro tuhé substráty. Lze ji také využít pro flexibilní a textilní substráty. Její nevýhodou je nutnost aplikovat tavidlo při pájecím procesu. V dnešní době je tento problém vyřešen pájkami (pastami), které už tavidlo obsahují nebo, lze dokonce pájet bez tavidla např. pomocí kyseliny mravenčí. Jako výhody této technologie se jeví hlavně vodivost vytvořeného spoje a jeho odolnost proti vlhkosti. Pro hromadnou výrobu plošných spojů se využívá strojní pájení před ručním. Ruční pájení je spíše vhodné pro opravy defektů na jednotlivých DPS nebo pro výrobu prototypů. Je to způsobeno hlavně jeho nepřesností a malou efektivitou. Jako strojní pájení lze využít pájení přetavením nebo pájení vlnou. Pájení přetavením má oproti pájení vlnou výhodu v možnosti lokálního zahřátí místa na desce. Tím se eliminuje i případné poškození komponent na stejné desce, které by mohly být zničeny vystavením této teplotě (teplota tavení běžně využívaných pájek se pohybuje kolem 200 – 220 °C). Pájení přetavením je proto nejčastěji využívaným procesem pro hromadnou výrobu DPS. Ovšem vzhledem k omezení olova a výskytu whiskerů je nebezpečné využívat tuto technologii ve specifických průmyslových odvětvích. Například ve zdravotnictví je výskyt whiskerů velice nebezpečný a mohlo by dojít i k ohrožení života vlivem vytvoření zkratu whiskerem. Pájení také není ideální využívat na velmi ohebných nebo textilních substrátech vzhledem k malé flexibilitě pájeného spoje.

Technologii lepení lepidly lze považovat jako alternativu k pájení. Nevýhody ovšem tkví např. v jejich ceně, která je vyšší než cena pájek. Taktéž odolnost proti vlhkosti, životnost, poměrně dlouhá doba vytvrzování (může dosahovat i 100 hodin) nebo hromadnost (zautomatizovanost procesů). Všechny tyto faktory patří mezi omezující podmínky pro použití technologie lepení lepidly. Výhodou této technologie je například nízká teplota vytvrzování (lepidlo lze vytvrdit např. i při 25 °C) nebo flexibilita vytvořeného spoje. Metody lepení lze tedy využít, stejně jako pájky, na tuhých, flexibilních

či textilních substrátech. Obecně ale lze říci, že lepidla jsou především využívána tam, kde nelze pájecí procesy uskutečnit nebo by vytvořením pájeného spoje mohlo dojít k poškození součástek a substrátu. Jedná se například o kontaktování na flexibilní substráty, které mají nízkou tepelnou odolnost (PET substrát). Další příklad využití můžeme nalézt ve zdravotnictví. Jak už bylo řečeno tvorba whiskerů může způsobit i ohrožení zdraví, což je při použití lepidel eliminováno. Jako další využití lze uvést kontaktování součástek s velmi malými roztečemi či kontaktování zobrazovacích jednotek jako jsou OLED či LCD panely. Při tomto kontaktování je využíváno především anizotropní lepidlo (anizotropní film) popřípadě nevodivé lepidlo. Nevodivé lepidlo je také využito pro fixaci součástek. Jedná se například o fixaci při procesu wire bonding nebo při pájení vlnou, kdy je využito pro fixaci SMD součástek, které jsou otočeny vzhůru nohama.

Kontaktování pomocí inkoustu přístrojem Aerosol Jet® je spíše ve stavu zkoumání. Lze ji využít ke kontaktování SMD součástek, ale pokud uživatel nevlastní nákladný systém Aerosol jet není zde zatím důvod ho využít. Tato technologie také není příliš rozšířená v průmyslové výrobě. Ovšem výhoda v budoucnosti může být ve spojení procesů vytváření tištěné elektroniky (např. vodivé cesty) a kontaktování SMD součástek do jednoho procesu.

Technologie bondování je proces, který nalézá uplatnění hlavně při pouzdření součástek. Například wire bonding je už osvědčený a stále používaný způsob kontaktování při pouzdření, který využívá svařování. Jako další velmi využívaný způsob při pouzdření se používá flip chip. Výhoda flip chipu oproti wire bonding je možnost využití lepidla či pájky k vytvoření vodivého kontaktu, avšak cena je také vyšší než u wire bondingu. TAB je využíván hlavně při pouzdření na flexibilní substráty.

## 8 Závěr

Cílem této bakalářské práce byla rešerše různých technologií pro kontaktování v elektronice a možnosti jejich využití. V této práci je věnována pozornost hlavně technologiím pájení a lepení. Jsou zde však uvedeny i jiné technologie.

V prvních dvou částech jsou popsány klasické technologie, jako je pájení a lepení. Dále je zde věnována pozornost porovnání obou metod. Čtvrtá část je věnována bondování. Pro bondování jsou nejčastěji využívány principy svařování (technologie wire bonding) nebo pájení a lepení (technologie flip chip). Další využívaná metoda bondování je TAB, která je především využívána pro flexibilní substráty.

V případě pájení zde byly uvedeny technologie ručního a strojního pájení. Z uvedených informací vyplývá, že v dnešní době je ve výrobě využíváno strojní pájení a to především strojní pájení přetavením. Pro strojní pájení se dnes už využívají pouze bezolovnaté pájky (z důvodu ochrany životního prostředí), což způsobilo nárůst teplot potřebných pro jejich tavení (teploty tavení se pohybují kolem 210 °C). Mezi nejvyužívanější pájky patří například SAC (Sn-Ag-Cu) a SC (Sn-Cu). Při pájení je také nutnost povrch dokonale očistit, k čemuž je využíváno tavidel. Dnes už ale lze tavidla vynechat například použitím kyseliny mravenčí při pájení v parách či působením plasmatu. Technologie pájení je využitelná na skoro všech typech zde popsaných substrátů. Její omezení však nastává v případě využití na nízkoteplotních substrátech. Týká se to především plastových flexibilních substrátů. Pružnost pájených spojů taktéž není ideální a na flexibilních deskách dochází k poškození spoje vlivem ohybu desky.

V případě technologie lepení jsou v práci lepidla rozdělena na izotropní, anizotropní a nevodivá lepidla. Každý typ lepidla má uvedeno složení a způsob aplikace a vytvrzení. Obecně lze říci, že každý typ lepidla má své výhody a nevýhody. Hlavní odlišnost lepidel od pájek při procesu kontaktování je nutnost lepidla vytvrdit. Vytvrzení u lepidel je možno provést teplotou či UV zářením. V případě anizotropních a nevodivých lepidel je nutno k procesu vytvrzování použít i tlak. Použitím lepidel lze nahradit proces pájení. Například izotropní lepidlo je využíváno nejčastěji jako náhrada pájky hlavně tam, kde je potřeba

nízká teplota při procesu kontaktování. Teplota vytvrzování lepidel může být i 25 °C, avšak poté je doba vytvrzování velmi dlouhá (i 100 hodin).

Kromě klasických technologií kontaktování je v této práci uvedena také technologie kontaktování pomocí vodivého inkoustu. Konkrétně jsem se zabýval technologií využívající techniku Aerosol Jet®. Tato technologie nabízí možnost tvořit vodivé cesty a zároveň kontaktovat SMD součástky v jednom procesu.

V dalších částech práce jsem se věnoval možnosti využití jednotlivých technologií na různé substráty. Jsou zde uvedeny jak konvenční substráty (např. FR4) tak také flexibilní a textilní. U textilních substrátů se místo klasických metod kontaktování využívá často také metody vyšívání, kde dochází ke spojení destičky (substrátu) se součástkou pomocí vodivé příze (v substrátu jsou vytvořeny pokovené otvory, do kterých se vloží vodivá příze).

Při zhodnocení jednotlivých technologií se pájení jeví jako nejvhodnější metoda kontaktování a to především na tuhé substráty. U flexibilních už záleží na mnoha faktorech. Mezi tyto faktory lze zařadit teplotu tavení pájky a teplotní odolnost substrátu nebo míru ohebnosti substrátu. Pro textilní substráty je použití pájení spíše nevhodné.

Závěrem lze říci, že technologie pájení i lepení nabízí několik výhod (např. vodivost pouze v jednom směru při lepení nebo životnost u pájeného spoje) i nevýhod (např. menší vodivost při lepení či vysoká teplota tavení pájky). Avšak i v dnešní době je pájení nejčastěji využívanou technologií pro kontaktování součástek zejména při povrchové montáži. Pájené spoje totiž nabízí vysokou vodivost, odolnost a spolehlivost, které lepené spoje (zatím) nedosahují. Pájení je také dostupnější i z důvodu automatizovaných postupů a velmi hlubokých znalostí těchto technologií, plynoucích z dlouholeté praxe. Ovšem bez lepidel už se dnes nelze obejít z důvodu jejich nízké teploty vytvrzování a tím pádem jejich potenciálu v kontaktování na moderních teplotně citlivých substrátech, jako např. na ohebných fóliích pro tištěnou elektroniku či inteligentních textiliích pro elektroniku nositelnou.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdrění aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [2] Lepidla a techniky lepení součástek. *DPS: Elektronika od A do Z* [online]. Liberec, 2013 [cit. 2020-2-4]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:2612/lepidla-a-techniky-lepeni-soucastek>
- [3] GOMATAM, R. a K. L. MITTAL. *Electrically conductive adhesives*. Boston: VSP, 2008. ISBN 9004165924.
- [4] JURAČKA, M. *Možnosti Pájení SMD součástek pomocí zařízení Fritsch* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-2-1]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=85151](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85151). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Martin Adámek
- [5] *Propojování v elektronice-elektrické spoje a jejich realizace*. [online]. Brno [cit. 2020-2-2]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-06A-Propojov%C3%A1n%C3%AD%20v%20elektronice%20-%20elektrick%C3%A9%20spoje\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-06A-Propojov%C3%A1n%C3%AD%20v%20elektronice%20-%20elektrick%C3%A9%20spoje(Bc).pdf). Výuková prezentace
- [6] *Propojování v elektronice-elektrické spoje* [online]. Brno [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/08a\\_propojovani\\_v\\_elektronice.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/08a_propojovani_v_elektronice.pdf). Výuková prezentace
- [7] COB II-kontaktování polovodičových čipů (technologický proces). *DPS: Elektronika od A do Z* [online]. Liberec, 2018 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:53141/cob-ii-kontaktovani-polovodicovych-cipu-technologicky-proces->
- [8] Přetavení infračerveným zářením. *SMT centrum* [online]. 2017 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-pretavenim/pretaveni-infracervenym-zarenim/>
- [9] Intermetalické sloučeniny. *SMT centrum* [online]. 2017 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyroba-desek-plosnych-spoju/intermetalicke-slouceniny/>
- [10] *Spolehlivost pájených spojů* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2020-02-05]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/10482/1/BP-Spolehlivost%20pajenych%20spoju-Lomersky%20Filip.pdf>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Václav Wirth.



- [11] *Technologie pájení a vodivého lepení v elektronice* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2020-02-05]. Dostupné z: [https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/23130/1/Konecna\\_Prace\\_Se\\_Zadanim.pdf](https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/23130/1/Konecna_Prace_Se_Zadanim.pdf). Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Martin Hirman.
- [12] MITZNER, Kraig. *Complete PCB design using OrCad capture and layout*. Boston: Elsevier/Newnes, c2007. ISBN 978-0-7506-8214-5.
- [13] JUDD, Mike a Keith BRINDLEY. *Soldering in electronics assembly*. 2nd ed. Boston: Newnes, 1999. ISBN 0750635452.
- [14] LEE, Ning-Cheng. *Reflow soldering processes: SMT, BGA, CSP and flip chip technologies*. Boston: Newnes, c2002. ISBN 0750672188.
- [15] Modifikovaná elektricky vodivá lepidla. *Elektroscope* [online]. FEL ČVUT Praha: P. Mach, 2009, 2009, (II), 4 [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/528/1/r3c2c7.pdf>
- [16] *Diagnostika propojovacích struktur* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2020-03-8]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/4713/1/Diagnostika\\_propojovacich\\_struktur\\_%28BP%29\\_NETRH.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/4713/1/Diagnostika_propojovacich_struktur_%28BP%29_NETRH.pdf). Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Václav Wirth.
- [17] Non-Conductive Adhesive. *Polymer science learning center* [online]. [cit. 2020-03-7]. Dostupné z: <https://pslc.ws/macro/mpm/applicat/dartop11.htm>
- [18] Non-Conductive Adhesive (NCA) for Consumer Electronics. *Heraeus* [online]. [cit. 2020-03-7]. Dostupné z: [https://www.heraeus.com/en/het/products\\_and\\_solutions\\_het/adhesives/nca/nca\\_page.html](https://www.heraeus.com/en/het/products_and_solutions_het/adhesives/nca/nca_page.html)
- [19] Požadované vlastnosti lepidel pro SMD. *SMT centrum* [online]. 2017 [cit. 2020-3-7]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyber-lepidla-pro-smd/pozadovane-vlastnosti-lepidel-pro-smd/>
- [20] KRISTIANSSEN, Helge, Susanne HELLAND, Sigurd PETTERSEN a Patricia AL-ALAM. Study of electrical and thermal conduction mechanisms in novel isotropic conductive adhesive. In: *2016 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)* [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 43-46 [cit. 2020-05-04]. DOI: 10.1109/ICSJ.2016.7801285. ISBN 978-1-5090-2037-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7801285/>
- [21] LI, Yi, Daniel LU a C. P. WONG. *Electrical conductive adhesives with nanotechnologies*. London: Springer, c2010. ISBN 978-0-387-88782-1.
- [22] CHAUHAN, Preeti S. *Copper wire bonding*. New York: Springer, [2014]. ISBN 978-1-4614-5760-2.

- [23] *Připojování čipů na kontakty základny* [online]. Praha, 2015 [cit. 2020-3-15]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/1690/mod\\_resource/content/1/Kontaktovani\\_cipu.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/1690/mod_resource/content/1/Kontaktovani_cipu.pdf) Výuková prezentace
- [24] *Pájené spoje* [online]. Kyjov [cit. 2020-3-16]. Dostupné z: [http://www.sossoukyjov.cz/data/file/Strojnictvi/VY\\_32\\_INOVACE\\_5c/VY\\_32\\_INOVACE\\_5c02.pdf](http://www.sossoukyjov.cz/data/file/Strojnictvi/VY_32_INOVACE_5c/VY_32_INOVACE_5c02.pdf) Výuková prezentace
- [25] LEE, Tae-Kyu. *Fundamentals of lead-free solder interconnect technology: from microstructures to reliability*. New York: Springer, 2014. ISBN 978-1-4614-9265-8.
- [26] ZRUBECKÝ, Filip. *Pájecí slitiny v elektrotechnice* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18858/1/Bakalarska%20prace%20Zrubecky%20%28elektronicka%20verze%20se%20zadanim%29.pdf>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Martin Hirman.
- [27] PÍCHA, Jan. *Studium spolehlivosti bezolovnatého pájení* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27814](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27814). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ivan Szendiuch.
- [28] Pájení bez olova. *KOKI* [online]. Brno [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <http://www.koki.org/pajenibezolova.html>
- [29] PAŠKO, Martin. *Analýza změn v pájených spojích vzniklých vlivem stárnutí* [online]. Brno, 2011 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=41196](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41196). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Petr Stejskal.
- [30] *Spoje a spojovací součásti* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: [http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY\\_32\\_INOVACE\\_13-17.pdf](http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_13-17.pdf) Výuková prezentace
- [31] ZAHRADNÍK, Vít. *Sledování chování pájecích slitin prostřednictvím měření latentního tepla* [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/84832249.pdf>. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [32] Tape-Automated bonding [TAB]. *EMBEDDED Artistry* [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://embeddedartistry.com/fieldmanual-terms/tape-automated-bonding/>

- [33] MENZ, Wolfgang, Jürgen MOHR a Oliver OLIVER PAUL. New Contacting Technologies. *Microsystem Technology* [online]. Freiburg, Germany: John Wiley, 2001, s. 418-420 [cit. 2020-03-31]. ISBN 3527296344. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=0ozuHrTkRUYC&pg=PA418&lpg=PA418&dq=contacting+chip+with+tape+automated+bonding&source=bl&ots=tQOyoAcvdY&sig=ACfU3U1D8qL1HXAjW1ASVSgVtQSOmKS0IA&hl=cs&sa=X&ved=2ahUK EwiOyP\\_BuMLoAhWIEMAKHY4qA\\_0Q6AEwDXoECAoQAQ#v=onepage&q=contacting%20chip%20with%20tape%20automated%20bonding&f=false](https://books.google.cz/books?id=0ozuHrTkRUYC&pg=PA418&lpg=PA418&dq=contacting+chip+with+tape+automated+bonding&source=bl&ots=tQOyoAcvdY&sig=ACfU3U1D8qL1HXAjW1ASVSgVtQSOmKS0IA&hl=cs&sa=X&ved=2ahUK EwiOyP_BuMLoAhWIEMAKHY4qA_0Q6AEwDXoECAoQAQ#v=onepage&q=contacting%20chip%20with%20tape%20automated%20bonding&f=false)
- [34] DÓCZY, Robert. *Izolační vlastnosti struktur typu flip chip* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=57790](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=57790). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří Pulec.
- [35] Pájení v parách. *SMT centrum* [online]. 2017 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-v-parach/pajeni-v-parach/>
- [36] HINTERMÜLLER, Jan. *Vliv teplotního profilu u pájení přetavením na tvorbu intermetalických vrstev* [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76708/F3-BP-2018-Hintermuller-Jan-%5B%20Vliv%20teplotniho%20profilu%20u%20pajeni%20pretavenim%20na%20tvorbu%20intermetalickyh%20vrstev%5D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [37] Fluxless Formic Acid Technology to Reduce Metal Oxides. *Palomar Technologies* [online]. 2017, 2017 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://www.palomartechnologies.com/blog/fluxless-formic-acid-technology-to-reduce-metal-oxides>
- [38] Jak se vyrábí tištěná elektronika. *DPS: Elektronika od A do Z* [online]. Liberec, 2013 [cit. 2020-04-4]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:3140/jak-se-vyrabi-tistena-elektronika>
- [39] WONG, William S. a Alberto SALLES, *Flexible Electronics: Materials and Applications*. Boston, MA: Springer US, 2009. ISBN 978-0-387-74363-9.
- [40] HIRMAN, Martin. *Materiálové a procesní aspekty připojování součástek na flexibilní substráty* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27045/1/DISERTACE\\_Hirman\\_v167\\_FIN\\_AL.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27045/1/DISERTACE_Hirman_v167_FIN_AL.pdf). Disertační práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická.
- [41] ZELENKA, Robert. *Testování vodivě lepených spojů pro flexibilní elektroniku* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27045/1/DISERTACE\\_Hirman\\_v167\\_FIN\\_AL.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27045/1/DISERTACE_Hirman_v167_FIN_AL.pdf). Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Tomáš Džugan.

- [42] KHAN, Saleem, Leandro LORENZELLI a Ravinder S. DAHIYA. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2015, **15**(6), 3164-3185 [cit. 2020-04-05]. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2375203. ISSN 1530-437X. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6974982/>
- [43] KOGA, Hirotaka a Masaya NOGI. Cellulose Paper Composites for Flexible Electronics. *Lignocellulosics* [online]. Elsevier, 2020, 2020, s. 171-191 [cit. 2020-04-05]. DOI: 10.1016/B978-0-12-804077-5.00011-7. ISBN 9780128040775. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128040775000117>
- [44] RŮŽIČKA, Jan. *Přehled vodivých inkoustů pro systém aerosol jet printing* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/23148/1/BP\\_Jan\\_Ruzicka.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/23148/1/BP_Jan_Ruzicka.pdf). Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Jiří Navrátil.
- [45] CRUZ, Sílvia Manuela Ferreira, Luís A. ROCHA a Júlio C. VIANA. Printing Technologies on Flexible Substrates for Printed Electronics. RACKAUSKAS, Simas, ed. *Flexible Electronics* [online]. InTech, 2018, 2018-07-25 [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.5772/intechopen.76161. ISBN 978-1-78923-456-5. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/flexible-electronics/printing-technologies-on-flexible-substrates-for-printed-electronics>
- [46] Aerosol Jet Printing aneb když tranzistor prochází tryskou. *Vývoj.HW* [online]. Praha, 2015 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [47] K. K. Christenson, J. a Paulsen, M. J. Renn, K. Mcdonald, J. Bourassa, and S. Paul, Direct Printing of Circuit Boards Using Aerosol Jet, NIP 27 Digit. Fabr., pp. 433436, 2011.
- [48] NAVRÁTIL, Jiří. *Aerosol Jet®bondování SMD součástek* [online]. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/26515/1/Navratil.pdf>
- [49] TONG, Ge, Zhou JIA a Joseph CHANG. Flexible Hybrid Electronics: Review and Challenges. In: *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)* [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 1-5 [cit. 2020-04-08]. DOI: 10.1109/ISCAS.2018.8351806. ISBN 978-1-5386-4881-0. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8351806/>
- [50] Flexible Hybrid Electronics. *Design HMI* [online]. 2016 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <http://www.designhmi.com/2016/07/26/flexible-hybrid-electronics/>
- [51] SYROVÝ, Tomáš. Využití tiskových technologií pro smart package aplikace projektu. *Design HMI* [online]. Pardubice, Katedra polygrafie a fotofyziky, 2015 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: [https://www.otk.cz/media/cache/file/4d/otksmartpack2015\\_upce\\_syrovy.pdf](https://www.otk.cz/media/cache/file/4d/otksmartpack2015_upce_syrovy.pdf)

- [52] Your PCB substrate: a guide to materials. *Essentra components* [online]. Velká Británie, 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.essentracomponents.com/en-gb/news/guides/your-pcb-substrate-a-guide-to-materials>
- [53] KALTMAYER, Jan. *Technologie pro výrobu desek plošných spojů* [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76500/F3-BP-2018-Kaltmeyer-Jan-Kaltmeyer\\_technologie%20pro%20vyrobu%20DPS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76500/F3-BP-2018-Kaltmeyer-Jan-Kaltmeyer_technologie%20pro%20vyrobu%20DPS.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ivana Beshajová Pelikánová.
- [54] PCB FR4: the guide to FR-4 for your printed circuits. *PROTO-ELECTRONICS* [online]. Francie [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.proto-electronics.com/blog/the-4-electronic-component-suppliers-of-proto-electronics-0>.
- [55] Single Side Pcb FR4. *Indiamart* [online]. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/single-side-pcb-fr4-18609831112.html>
- [56] YU HIN CHAN, JANG-KYO KIM, DEMING LIU, PETER CHOU KEE LIU, YIU MING CHEUNG a MING WAI NG. Improvements in Au wire bondability of rigid and flexible substrates using plasma cleaning. In: *2005 6th International Conference on Electronic Packaging Technology* [online]. IEEE, 2005, s. 366-371 [cit. 2020-05-10]. DOI: 10.1109/ICEPT.2005.1564609. ISBN 0-7803-9449-6.
- [57] Flexible substrates. *Millenium Circuits Limited* [online]. Derry St. Harsburg, 2019 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.mclpcb.com/flexible-substrate>
- [58] *Elektricky vodivé lepení v elektrotechnice*. [online]. Praha [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34502/mod\\_resource/content/1/Elektricky\\_vodive\\_lepeni\\_v\\_elektrotechnice.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34502/mod_resource/content/1/Elektricky_vodive_lepeni_v_elektrotechnice.pdf). Výuková prezentace
- [59] Flexible PCB and Its Assembly Technology. *Pcbcart* [online]. Čína [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.pcbcart.com/article/content/flexible-pcb-assembly-technology.html>
- [60] ARRESE, J., G. VESCIO, E. XURIGUERA, B. MEDINA-RODRIGUEZ, A. CORNET a A. CIRERA. Flexible hybrid circuit fully inkjet-printed: Surface mount devices assembled by silver nanoparticles-based inkjet ink. *Journal of Applied Physics* [online]. 2017, **121**(10) [cit. 2020-04-13]. DOI: 10.1063/1.4977961. ISSN 0021-8979. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4977961>
- [61] GLADWIN, Dave. PCB future is lightweight, low-cost, and flexible: Product how-to. *EDN* [online]. 2015 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.edn.com/pcb-future-is-lightweight-low-cost-and-flexible-product-how-to/>
- [62] Chip-on-Board (COB). *Eesemi* [online]. 2005 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.eesemi.com/cob.htm>

- [63] Tavidla bez čištění. *SMT centrum* [online]. 2017 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyber-tavidel/tavidla-bez-cistení/>
- [64] Olovnaté a bezolovnaté pájky. *Kondik* [online]. Jablonec nad Nisou, 2019 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.kondik.cz/olovnata-a-bezolovnata-pajka>
- [65] O'BOYLE, John. Tin Whiskers Are Real and Complex. *Maxim Integrated Products* [online]. USA, 2011 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/5/5250.html>
- [66] Wave Soldering - for PCB assembly. *Electronicsnotes* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: [https://www.electronics-notes.com/articles/constructional\\_techniques/soldering/wave-soldering.php](https://www.electronics-notes.com/articles/constructional_techniques/soldering/wave-soldering.php)
- [67] BECKER, Dave. All About Flex: Soldering Flexible Circuits. *I-Connect007* [online]. 2016 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://pcb.icconnect007.com/index.php/article/99536/all-about-flex-soldering-flexible-circuits/99539/?skin=pcb>
- [68] Pájení laserem. *SMT centrum* [online]. 2017 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-laserem/pajeni-laserem/>
- [69] HIRMAN, Martin, Jiri NAVRATIL, Frantisek STEINER, Tomas DZUGAN a Ales HAMACEK. SMD Components Assembly on a Flexible Substrate by Non-Conductive Adhesives. In: *2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 1-6 [cit. 2020-05-10]. DOI: 10.1109/ISSE.2018.8443655. ISBN 978-1-5386-5731-7. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8443655/>
- [70] Adhezivní technologie. *Abe.tec* [online]. 2014 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <http://www.abetec.cz/procesy-v-mikromontazi/adhezivni-technologie/>
- [71] ŠPIROCH, Jan. *Vodivé lepení v elektrotechnice* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18838/1/BP\\_Vodive%20lepeni\\_Spiroch\\_Jiri.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18838/1/BP_Vodive%20lepeni_Spiroch_Jiri.pdf). Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Karel Rendl
- [72] BLACKWELL, Glenn R. *The electronic packaging handbook*. Boca Raton: CRC, c2000. ISBN 0-8493-8591-1.
- [73] J. SMALL, Darryl. Lead-free solders vs. conductive adhesives. *SEMICONDUCTOR-DIGEST* [online]. Rocky hill [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://sst.semiconductor-digest.com/2000/10/lead-free-solders-vs-conductive-adhesives/>
- [74] STOPPA, Matteo a Alessandro CHIOLERIO. Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review. *Sensors* [online]. 2014, **14**(7), 11957-11992 [cit. 2020-05-01]. DOI: 10.3390/s140711957. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/11957>

- [75] PAŠKOVÁ, Michaela. *Inteligentní textilie* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/10464/1/Michaela%20Paskova%20-%20Bakalarska%20prace.pdf>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Karel Hromadka.
- [76] E-Textiles For Wearability: Review Of Integration Technologies. *Textile World* [online]. North Caroline, 2010 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.textileworld.com/textile-world/features/2010/04/e-textiles-for-wearability-review-of-integration-technologies/>
- [77] MOUČKOVÁ, Kateřina. *Technologie a využití smart textilií pro monitorování životních funkcí* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27821/1/BP\\_Katerina\\_Mouckova.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27821/1/BP_Katerina_Mouckova.pdf). Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Tomáš Bystrický.
- [78] LOCHER, I. a A.G. SEFAR. Joining technologies for smart textiles. *Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers* [online]. Elsevier, 2013, 2013, s. 285-305 [cit. 2020-05-02]. DOI: 10.1533/9780857093530.2.285. ISBN 9780857093424. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857093424500109>.
- [79] GRIMMELSMANN, Nils, Yasmin MARTENS, Patricia SCHÄL, Hubert MEISSNER a Andrea EHRMANN. Mechanical and Electrical Contacting of Electronic Components on Textiles by 3D Printing. *Procedia Technology* [online]. 2016, 26, 66-71 [cit. 2020-05-02]. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.08.010. ISSN 22120173. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212017316303577>
- [80] SCHNEEGASS, Stefan a Oliver AMFT, ed. *Smart Textiles* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017 [cit. 2020-05-02]. Human-Computer Interaction Series. DOI: 10.1007/978-3-319-50124-6. ISBN 978-3-319-50123-9.
- [81] Novel Joining Methods Applicable to Textiles and Smart Garments. *TWI Global* [online]. University of Wales, 2005 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/novel-joining-methods-applicable-to-textiles-and-smart-garments-september-2005>
- [82] MECNIKA, V., K. SCHEULEN, C.F. ANDERSON, M. HÖRR a C. BRECKENFELDER. Joining technologies for electronic textiles. *Electronic Textiles* [online]. Elsevier, 2015, 2015, s. 133-153 [cit. 2020-05-02]. DOI: 10.1016/B978-0-08-100201-8.00008-4. ISBN 9780081002018. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081002018000084>
- [83] *Hand soldering and assembly rework: Lead-free hand soldering* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: [http://www.ett.bme.hu/meca/Courses/AIT/7\\_4.html](http://www.ett.bme.hu/meca/Courses/AIT/7_4.html)

- [84] WILLIS, Bob. *Inspection of Conductive Adhesive Surface Mount Joints* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <http://www.visioneng.com/wp-content/uploads/2017/11/Conductive-Adhesive-Joint-Inspection-and-Quality-Control.10Nov2016.pdf>
- [85] ANDERSSON, Henrik, Johan SIDEN, Vincent SKERVED, Xiaotian LI a Linnea GYLLNER. Soldering Surface Mount Components Onto Inkjet Printed Conductors on Paper Substrate Using Industrial Processes. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* [online]. 2016, **6**(3), 478-485 [cit. 2020-05-10]. DOI: 10.1109/TCPMT.2016.2522474. ISSN 2156-3950. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7422029/>
- [86] Novel Conductive/Adhesive Materials for Flexible and Ultra-thin Sensors and Devices. *Yet2* [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.yet2.com/active-projects/novel-conductive-adhesive-materials-for-flexible-and-ultra-thin-sensors-and-devices/>
- [87] Wirebonding Services. *Accelonix* [online]. Cambridge [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://accelonix.co.uk/service-and-support/wirebonding-services>