

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tištěné tenzometrické prvky

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub ZDENĚK**
Osobní číslo: **E16B0175P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Tištěné tenzometrické prvky**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Proveďte rešerši v současnosti využívaných tenzometrických prvků. Do rešerše zahrňte i používané materiály či topologie.
2. Stručně popište tiskové technologie, vhodné pro tištěnou elektroniku (sítotisk, dispensing, inkjet, aerosol jet)
3. Diskutujte výhody a nevýhody tištěných tenzometrických prvků.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. An Introduction to Measurements using Strain Gages / Karl Hoffmann. – Darmstadt : Hottinger Baldwin Messtechnik, c1989. – xiii, 291 s. : il.
2. Muhammad Shakeel, Wasim A. Khan, Khalid Rahman, Fabrication of cost effective and high sensitivity resistive strain gauge using DIW technique, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 258, 1 May 2017, Pages 123-130, ISSN 0924-4247, <http://doi.org/10.1016/j.sna.2017.03.003>.
3. J. Navrátil. "Termomechanická Měření v Technologii Laserového Vrtání Otvorů," , Západočeská univerzita v Plzni, 2014.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Navrátil

Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018

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



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

Plzeň dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na tištěné tenzometrické prvky a jejich technologie výroby. V první části je popsána základní funkce, rozdělení a použití tenzometrů. Druhá část této práce se zabývá popisem tiskových technologií vhodných pro výrobu tištěných tenzometrů a tištěné elektroniky. Poslední část se věnuje diskuzi o tištěných tenzometrech a porovnání tiskových technologií.

Klíčová slova

Tenzometry, tištěné tenzometry, nositelná elektronika, sítotisk, dispenzing, ink-jet, aerosol jet.

Abstract

The presented bachelor thesis focuses on printed strain gauge elements and their production technology. The first part describes basic functions, sorting categories and application of strain gauges. The second part of this thesis deals with the description of printing technologies suitable for the production of printed strain gauges and printed electronics. The last part deals with the discussion of printed strain gauges and comparison of printing technologies.

Key words

Strain gauge, printed strain gauge, wearable electronics, screen printing, dispensing, ink jet, aerosol jet.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 4.6.2018

Jakub Zdeněk

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Navrátilovi, za cenné profesionální rady, odborné připomínky a metodické vedení práce při zpracování této práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 TENZOMETRICKÉ PRVKY	11
1.1 MATERIÁLY TENZOMETRU.....	12
1.1.1 <i>Kovové (odporové) tenzometry</i>	12
1.1.2 <i>Polovodičové tenzometry</i>	14
1.1.3 <i>Kapacitní tenzometry</i>	16
1.1.4 <i>Piezoelektrické tenzometry</i>	17
1.1.5 <i>Mechanické tenzometry</i>	18
1.1.6 <i>Tištěné tenzometry</i>	18
1.1.6.1 <i>Příklad tištěného tenzometru</i>	19
1.2 FYZIKÁLNÍ PRINCIP.....	20
1.2.1 <i>Kovové tenzometry</i>	20
1.1.1 <i>Polovodičové tenzometry</i>	21
1.3 OBLASTI POUŽITÍ TIŠTĚNÝCH TENZOMETRŮ.....	22
2 TISKOVÉ TECHNOLOGIE VHODNÉ PRO TIŠTĚNOU ELEKTRONIKU	26
2.1 TECHNOLOGIE SÍTOTISK.....	26
2.2 TECHNOLOGIE DISPENSING.....	32
2.3 TECHNOLOGIE INK-JET.....	33
2.4 TECHNOLOGIE AEROSOL JET.....	36
3 DISKUZE	40
ZÁVĚR	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43

Úvod

Tenzometry jsou v současnosti používány v různých odvětvích. Široké spektrum možných aplikací umožňuje používat tenzometr pro měření různých parametrů nejen v technice, ale například i v medicíně. V dnešní době už je možné naleznout tenzometr na nosných konstrukcích mostů, komponentů letadel, ale i při volnočasových aktivitách (sportovní náramky atd.). Výroba těchto tenzometrů je spojená s jednoduchými, ale i se složitými tiskovými technologiemi výroby. V posledních pár letech je tištěná elektronika na vzestupu.

Tištěná elektronika je stále více využívána hlavně kvůli nízké ceně, možnosti všestranného využití a masovosti výroby. Její možnosti využití jsou zajímavé. Nejvíce co se týče oblasti wearables technologie, kde se neustále vyvíjí nové možnosti přímo aplikovaných senzorů do oděvů apod. Celé odvětví tištěné elektroniky bude v budoucnosti určitě dále rozvíjeno.

Seznam symbolů a zkratk

CAD	Počítačem podporované projektování
CIJ	Princip tisku technologie ink-jet (kontinuální metoda)
DOD	Princip tisku technologie ink-jet (drop on demand)
PEN	Polyethylennaftalát
PET	Polyethylentereftalát
R	Elektrický odpor
%	Procenta
°C	Stupeň celsia
C	Teplotní součinitel
d	Průměr
E	Modul pružnosti
Hz	Hertz - jednotka frekvence
K	Součinitel deformační citlivosti
l	Délka
mg	Miligram
ml	Mililitr
mm	Milimetr
mPa·s	Pascal sekunda - viskozita
Q	Rezistivita vodivého materiálu
S	Obsah plochy
Shore A	Jednotka tvrdosti
T	Teplotní součinitel
v	Poissonův koeficient
ε	Koeficient zatížení
μm	Mikrometr
μp	Součinitel příčného stlačení
ρ	Hustota
Ω	Jednotka elektrického odporu
Ωcm	Měrný elektrický odpor

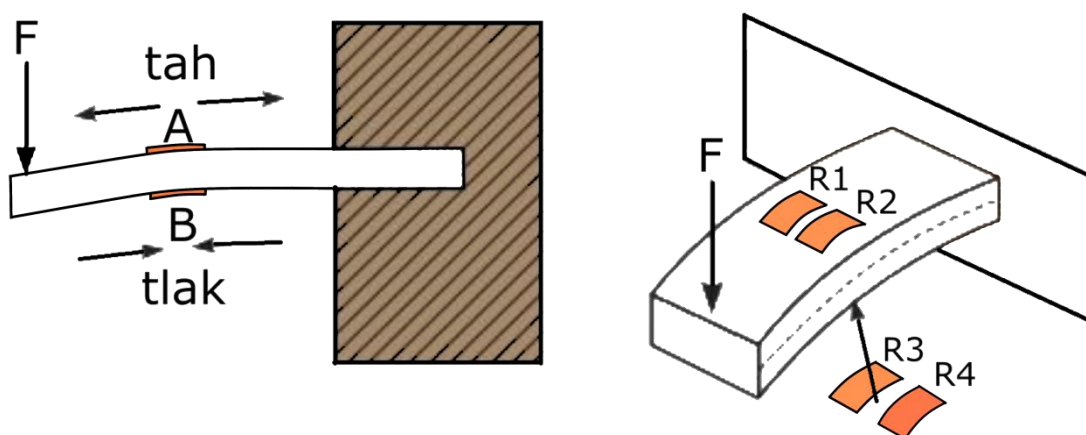
1 Tenzometrické prvky

Tenzometrický prvek je odporová součástka (senzor), která převádí změny mechanického pnutí na elektrické veličiny. Působením síly na objekt se objekt deformuje společně s tenzometrem a tato deformace způsobuje následnou změnu odporu. [1, 2]

„Změna vodivosti kovu při jejich deformaci byla objevena již kolem roku 1856. K aplikaci tohoto fyzikálního jevu došlo podstatně později a teprve po roce 1945. Napínání volně uchyceného drátku pro měření tlaku se objevuje již kolem roku 1928“ [1]. Postupně se tento typ snímače využívající deformaci kovového nebo polovodičového odporového článku velmi rozšířil. [1]

Rozdělení tenzometrů dle druhu měřené deformace lze provést pro měření [2, 1]:

- posuvů,
- poměrného prodloužení,
- křivosti,
- veličin dynamických procesů (jako je rychlost, zrychlení, frekvence), které jsou nutné pro stanovení chování součástí.



Obr. 1: Aplikace tenzometru [3]

Měření deformace pomocí tenzometrů předpokládá, že povrchové napětí na měřeném objektu je přenášeno bez ztráty na tenzometr. Výsledky tohoto měření vyžadují těsnou vazbu mezi tenzometrem a objektem. Velmi těsné spojení, které je potřeba zajistit mezi měřeným objektem a tenzometrem, je nejlépe zajištěno lepidlem. Jiné pojivové materiály a metody jsou převážně omezeny na speciální aplikace, jako je například

keramické lepení pro vysoké teplotní rozsahy, bodové svařování oceli konstrukce a podobně. Oba tyto procesy vyžadují speciální tenzometry. [2]

Elektricky odporové tenzometry svojí deformací způsobují změnu elektrického odporu, který úměrně mění napětí na výstupních svorkách. V úvodu byly uvedeny odkazy na dva typy měřících odporových tenzometrů, tj. na kov tenzometrických měřících přístrojů a polovodičových měřičů napětí. Princip činnosti je založen na dvou různých fyzikálních procesech, které jsou stručně popsány v další části této práce. [4]

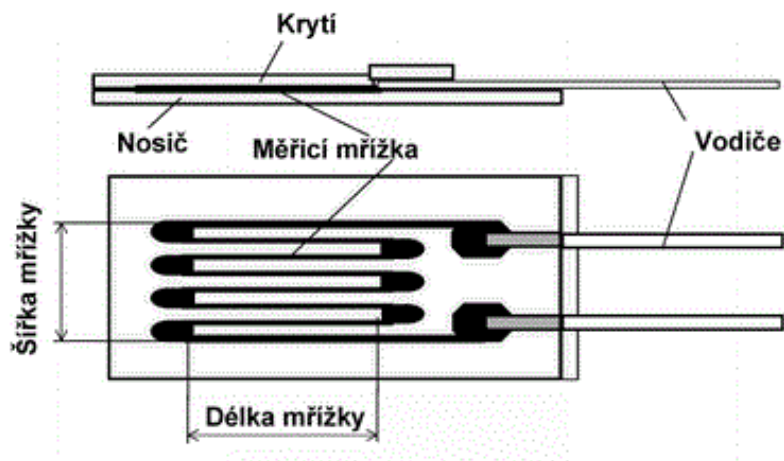
1.1 Materiály tenzometru

V následující kapitole budou popsány používané materiály vhodné k výrobě tenzometrů (drátové a tištěné). V případě kovů bylo potřeba zvolit takový materiál, který vykazuje při deformaci a změně teploty minimální změnu odporu. Většina kovů při teplotním namáhání mění znatelně svůj odpor a tím i související protékající proud a měřené napětí. Z tohoto důvodu se používají materiály, které nejsou značně teplotně závislé. [4]

1.1.1 Kovové (odporové) tenzometry

Ve druhé polovině třicátých let byla pozornost věnována vlivu, který Charles Wheatstone zmínil již v roce 1843 ve své první publikaci o mostovém obvodu, který vynalezl. [2] Tento efekt se projevuje změnou odporu v elektrickém vodiči v důsledku účinků mechanického namáhání. Změna odporu drátu pod napětím je velmi malá. Pro své měření používal Thomson vysoce citlivé galvanometry, které jsou nevhodné pro všeobecné technické aplikace nebo pro použití v průmyslu. Jsou vhodné pouze pro měření statických veličin. Teprve s příchodem elektronického zesilovače byly splněny tyto požadavky. [2, 1]

Pracovní princip kovového tenzometru napětí je založen na vztahu napětí a odporu elektrických vodičů, který byl objeven Wheatstonem a Thomsonem. Jakýkoli elektrický vodič změní svou odolnost mechanickým namáháním, například prostřednictvím napětí nebo tlakových sil. Změna odporu R je částečně způsobena kvůli deformacím vodiče a částečně i kvůli změně rezistivity vodivého materiálu Q v důsledku mikrostrukturálních změn. [2]



Obr. 2: Charakteristická konstrukce tenzometru s drátovou měřicí sítí (převzato z [5])

Samotný odporový drát má tvar mřížky. Na Obr. 2 je naznačené nejčastější provedení těchto typů tenzometrů a zároveň těch, které se nejvíce používají. Konce měrného drátu mají ostrý ohyb a podložka má trojnásobnou tloušťku. Celý snímač má tedy větší hmotnost. Odporová mřížka je vytvářena tak, že příčné dráty mají větší průměr. Příčná citlivost tenzometru je tedy menší. Materiál použitý na odporový článek závisí na rozsahu deformací. [5]

Používané materiály

- Chromniklové slitiny a konstantan, kde $\varepsilon = 4$ až 5% ,
- elinvar, slitiny Ni-Cr-Fe, manganin, kde $\varepsilon = 0,3$ až $0,4 \%$. [4]

Hodnoty odporu

- Pohybují se od 50 do 2500Ω ,
- nejčastější použití hodnot odporu je 130 , 300 a 600Ω . [6]

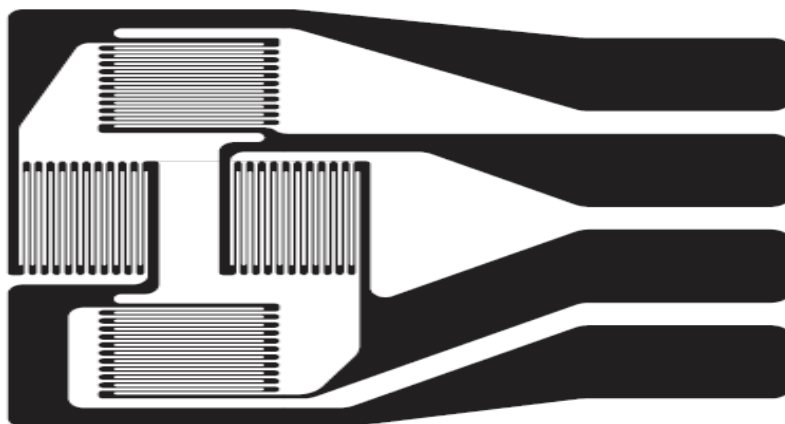
Rozměry tenzometrů

- Délka se pohybuje v rozsahu od 3 až 35 mm,
- šířka se pohybuje od $0,8$ až 12 mm, výjimečně se vyrábějí i delší, [1, 4]
- tloušťka tenzometru se pohybuje od $0,05$ až $0,1$ mm, může být i tlustší. [2]

Hmotnost tenzometrů závisí na rozměrech a začíná na 100 mg. Průměr aktivního odporového drátu se volí co nejmenší. Běžně se používá $25 \mu\text{m}$, výjimečně 5 až $10 \mu\text{m}$. Nejvyšší pracovní teplota je omezena materiálovými

vlastnostmi substrátu, 50 až 200 °C. [4]

V případech, kdy je nutné měřit poměrné prodloužení ve více směrech, se používá tzv. sružených tenzometrů (Obr. 3). Na jedné podložce je umístěno několik vhodně orientovaných vinutí, která mohou být umístěna nejen vedle sebe, ale i na sobě.



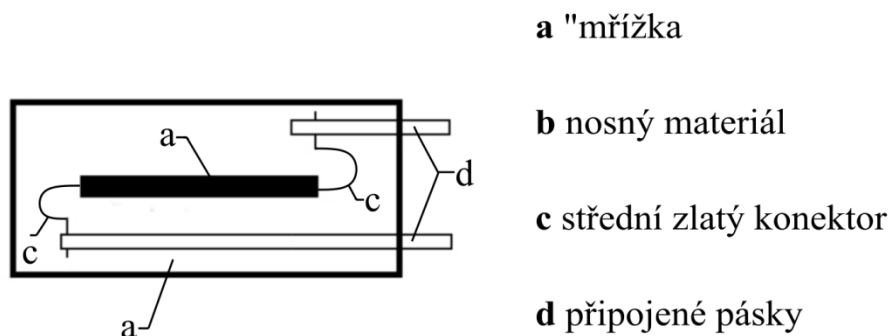
Obr. 3: Charakteristická konstrukce sružených tištěných tenzometrů (převzato z [7])

1.1.2 Polovodičové tenzometry

Jako další možnost materiálu konstrukce, ze které je tenzometr vyroben, je konstrukce polovodičová. Polovodiče také patří do této skupiny a rozšiřují rozsah aplikací v technologii tenzometrů. Princip měření je založen na polovodičovém piezoresistivním efektu objeveném C.S. Smithem v roce 1954. Původně používané germanium bylo později nahrazeno křemíkem. [4]

V konstrukci polovodičové jsou tenzometry v podstatě stejné jako tenzometry z kovového materiálu. Měřicí prvek sestává z pásku o šířce několika desetin milimetru a několika setinách hloubky milimetru, který je upevněn na izolační nosnou fólii a je opatřen spojovacími vodiči. Diodovému efektu je zabráněno použitím tenkého zlatého drátu, jenž spojuje polovodičový prvek a spojovacími drátky.

Stejně jako u kovových tenzometrů je měřicí účinek polovodičových tenzometrů založen na změně elektrického odporu, ale na rozdíl od kovových tenzometrů, je vztah napětí a odporu způsoben hlavně změnou pohyblivosti elektronů. Geometrická část změny odporu je však malá, menší než 2 %. [4]



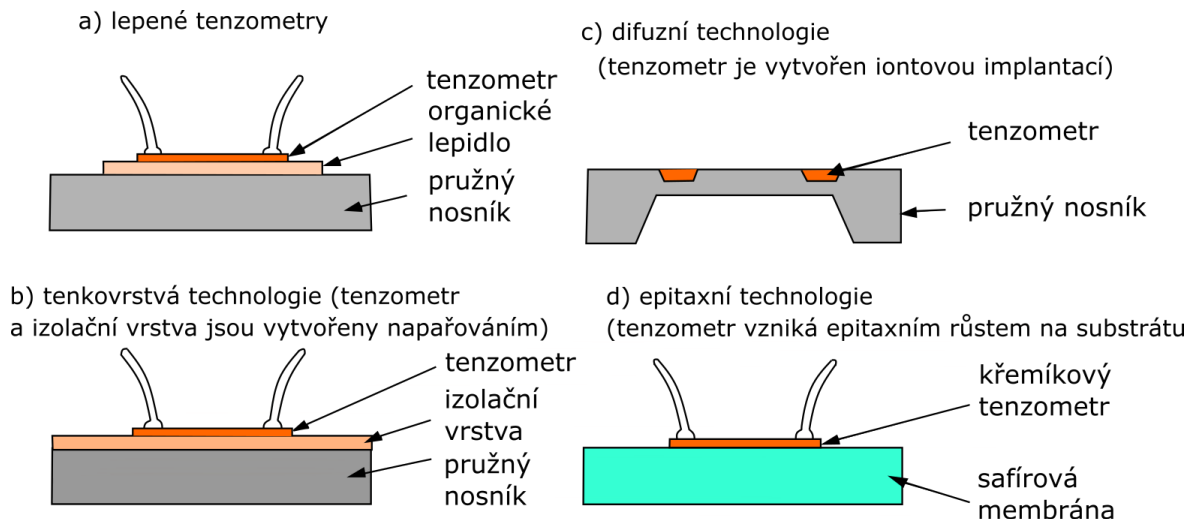
Obr. 4: Zobrazení konstrukce polovodičového tenzometru [4]

Změna odporu závisí na součiniteli deformační citlivosti polovodičového tenzometru na krystalografické orientaci, druhu vodivosti (typu P a N) a na měrném odporu. Pro tenzometry jsou nejvýhodnější tenká vlákna vyrobená z monokrystalu křemíku, především typu P s měrným odporem $0,1 \Omega\text{cm}$, orientovaná v krystalografickém směru. [4]

Z hlediska použitého materiálu lze polovodičové tenzometry dělit na [4]:

- **Monokrystalické**
 - a) Články získané rozřezáním z monokrystalu
 - b) Uhlíkové krystaly získané růstem v plynné fázi
 - c) Epitaxní vrstvy a dendridy
- **Polykrystalické** – umělé směsi jako je uhlík nebo bakelitový lak, které se však dále nevyvíjí.

V současné době je k výrobě polovodičových tenzometrů používán křemík. Za použití Czochralskyho metody [2], se dosáhne požadované hodnoty čistoty křemíku. Je to metoda, která velmi přesně orientuje krystalickou mřížku. Poté se do této krystalické mřížky přidá určité množství difúzních atomů procesem zvaný “doping“ [4]. Pro vyrobení čtyř složkového polovodiče se použijí například atomy boru nebo galia, což dává vodivost volným elektronům. Stupeň dopování určuje elektrickou vodivost. [4]



Obrázek 5: Zobrazení výroby konstrukce polovodičového tenzometru [8]

Charakteristickou vlastností takto připravených monokrystalů je to, že se jejich elektrický odpor mění pod vlivem napětí a síla tohoto účinku se mění ve třech osách krystalové mřížky. Pro pozitivní namáhání P-křemíku dochází na ose X k pozitivní změně odporu a na N křemíku dochází k záporné změně na ose Y. Při negativním namáhání je účinek obrácen. Zatímco efekty jsou zcela viditelné ve zmíněných směrech, mnohem slabší jsou v ostatních axiálních směrech. [1]

Jmenovitý odpor tenzometrů může být při stejných rozměrech v rozsahu od několika ohmů do jednotek megaohmů. Nejčastěji používané hodnoty odporu jsou 60, 120 a 350 Ω [1]. Dovolená teplota je teplota tavení spoje kov – polovodič. Mezní deformace ε_{\max} , při níž dochází ke změně tvaru tenzometru (k nevratným změnám), závisí na průřezu a povrchu polovodičového článku. Od teploty 20 do 315 $^{\circ}\text{C}$ se deformuje křemík pružně až do zničení. [4]

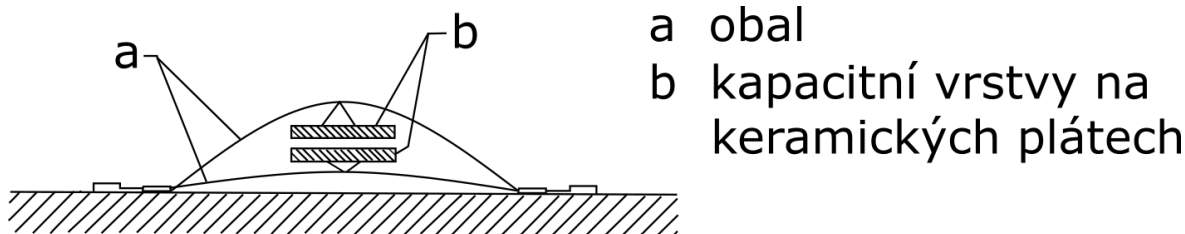
1.1.3 Kapacitní tenzometry

Další alternativou tenzometru je kapacitní konstrukce, která je považována hlavně za alternativní k běžným tenzometrům pro použití při vysokých teplotách za hranicemi teplotních vlastností měřicích kovových tenzometrů.

V současnosti existují tři známé verze [4]:

- **Britský vývoj Central Electricity Research Laboratories**

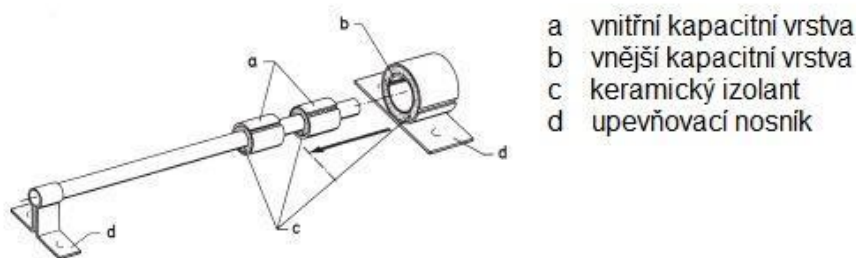
Zde se používá deskový kondenzátor, kterému se mění kapacita v závislosti na naměřeném napětí [5].



Obr. 6: Schéma kapacitního kmene pro měření kmene CERL-Planer [4]

- **Americký vývoj pro letadla Boeing**

Tenzometr, který je konstruován jako diferenciální kondenzátor [2].



Obr. 7: Schéma kapacitního kmene pro měření kmene CERL-Planer (převzato z [4]).

- **Německý vývoj společnosti Interatom**

Konstrukce je stejná jako deskový kondenzátor. Kapacitní snímače jsou připevněny ke zkoušenému objektu pomocí bodových svařovacích technik. Dobrých výsledků lze dosáhnout u kapacitních tenzometrů v teplotním rozmezí až do 500 °C. Použitelné výsledky měření lze aplikovat i v rozmezí teplot až do 800 °C. [4]

1.1.4 Piezoelektrické tenzometry

Piezoelektrické tenzometry jsou aktivní zařízení. Jako senzorový materiál se zde používá titanát barnatý. Stejně jako u piezoelektrických snímačů, které využívají jako snímací materiál křemík, má tenzometr na svém povrchu elektrický náboj, který je úměrný napětí a který lze měřit pomocí nabíjecích zesilovačů. Statické měření je možné pouze za určitých podmínek. Piezoelektrické tenzometry jsou používány velice zřídka a podle názoru [2] se zdá, že se nebudou používat ani v budoucnosti. [4]

1.1.5 Mechanické tenzometry

Tato zařízení se vyskytují poměrně málo, ale mají dlouhou tradici. Vzhledem k jejich konstrukci mohou být obvykle aplikovány pouze na větší předměty. Měření je zobrazeno stopou, která je vyškrábnuta na kovové desce nebo na skleněném válci, který však může být vyhodnocen pouze na konci zkoušky pod mikroskopem. Tato nevýhoda je kompenzována velkým využitelným teplotním rozsahem těchto tenzometrů. Zaznamenané měření lze nadále číst, i pokud je měnič vystaven požáru tj. například po havárii. Tato metoda se například používá ve výškových budovách či na mostních konstrukcích. [7, 4]

1.1.6 Tištěné tenzometry

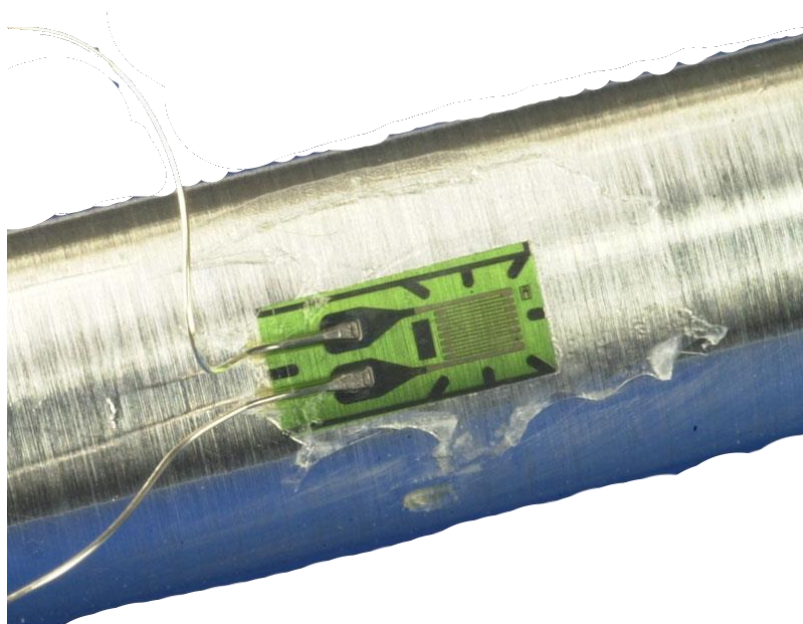
Tištěné tenzometry jsou vhodné pro plošné měření povrchového napětí. Aplikací několika tenzometrů vedle sebe (tj. vytvořením pole senzorů), lze dosáhnout daleko vyšší citlivosti. Tyto klíčové vlastnosti mají tenzometry tištěné aditivními metodami jako například ink-jet nebo sítotisk na flexibilní substráty (např. PET, PEN či polyamidové folie). [8]

V posledních deseti letech byly inovativní technologie a funkční materiály zkoumány pro vývoj a aplikací tištěné elektroniky a senzorů. Tištěné tenzometry jsou nízkonákladový, flexibilní a lehký systém pro sledování stavu komponentů například u letadel. [9]

K tisku se používá piezoelektrický inkoust. Tenzometry mohou být vytištěny na jeden flexibilní substrát. Tento substrát je následně snadno integrován na cílovou strukturu bez velkého přidání hmotnosti. Tento systém umožní v reálném čase zajistit informace o měřeném objektu a umožňuje rychlou diagnózu klíčových konstrukčních prvků jak při provozu tak při údržbě, ovšem možnosti využití jsou velmi široké. Jsou vhodné pro jakoukoliv konstrukci, která vyžaduje kontrolu tahu v reálném čase. Jako základní konstrukční prvek je použit serpentinový inkoustový motiv, který převádí mechanické napětí na měřitelné piezoelektrické změny. Životnost a citlivost jsou do značné míry ovlivněny metodou tisku a substráty. [9]

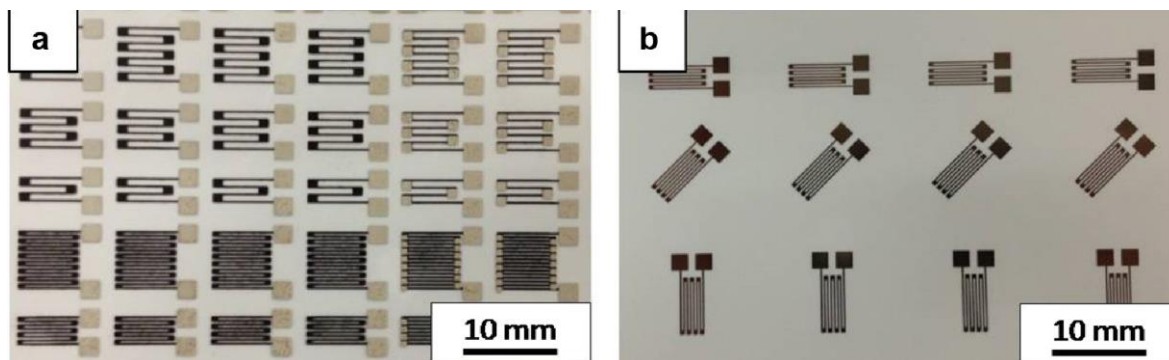
1.1.6.1 Příklad tištěného tenzometru

V praxi se nejčastěji používá typ tenzometru, který je složen z tenké masky z vodivého materiálu nanesené na ohebném substrátu. Tenzometr se poté přilepí vhodným lepidlem na požadovaný měřený objekt. Jako výrobní technologie byl zvolen sítotisk a inkoustový tisk. Tenzometry byly tištěny na substráty PET o tloušťce 5 μm [9]. Tisknutý materiál je serpentinovitého tvaru z uhlíkového inkoustu. Uhlíkový inkoust se vytvrzuje v peci při teplotě 105 $^{\circ}\text{C}$ po dobu 30 minut. Druhý materiál byl zvolen ve formě stříbrných nanočástic. [9]



Obr. 8: Příklad použití tisknutého tenzometru (převzato [10])

Při inkoustovém tisku se nanese inkoustové stříbrné nanočástice na porézním film pokrytý oxidem hlinitým. Tvar použitý pro inkoust nanočástic stříbra byl založen na standardním inkoustu a byl modifikován tak, aby byla zajištěna tvorba inkoustových kapiček a přímá tisková cesta se jmenovitým poklesem objemu 1 pl. Serpentinovitě tisknuté odporové tenzometry byly vyrobeny dvěma způsoby tisku a nechaly se vytvrdit při pokojové teplotě po dobu 24 hodin. Na Obr. 9 jsou znázorněny tištěné inkoustové tenzometry na PET podložkách. Sítotiskově tisknuté snímače (tenzometry) testované v této formě mají délku průměrně 8,1 mm a šířku čáry 340 μm . Inkoustově tisknuté tenzometry mají délku průměrně 9,1 mm s šířkou čáry 180 μm . [11]



Obr. 9: Příklad tisknutého tenzometru na PET substrát (převzato z [11])

Tištěné tenzometry spolu s komerční fólií byly připojeny k hliníkovému paprsku. Po vytištění tenzometrů se provádí únavový test čtyřbodovým ohýbacím zařízením. Pro vyhodnocení se údaje o deformaci v reálném čase měří kalibrovanou komerční fólií a změna odporu měřicího přístroje se nepřetržitě zaznamenává záznamovým zařízením pro měření odporu. Nakonec jsou tyto údaje o napětí a odporu synchronizovány a vyneseny do grafu. [10]

1.2 Fyzikální princip

Tenzometrie funguje na jednoduchém principu, kde se deformace vodiče projeví jako změna odporu a tím i napětí na výstupních svorkách. Důležité je správné zvolení vodiče či materiálu, který není teplotně závislý a bude správně pracovat ve zvolených podmínkách. [4, 9]

1.2.1 Kovové tenzometry

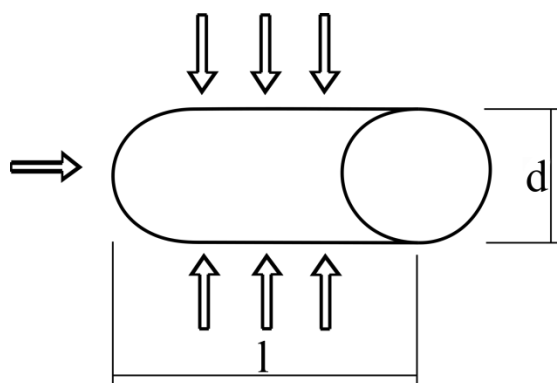
Pro odpor válcového vodiče o délce l a průřezu S můžeme podle Obr. 10 psát

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

Relativní změnu odporu vypočítáme ze vztahů

$$\ln R = \ln \rho + \ln l - \ln S \quad (2)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{d\rho}{\rho dR} + \frac{dl}{l dR} - \frac{dS}{S dR} \quad (3)$$



Obr. 10: Působení vnějších sil na vodič [2]

Změna odporu odporového článku je možná změnou měrného odporu ρ a změnou jeho rozměrů (l , d , S). Působí-li na válcový vodič všestranný tlak, vzniknou ve třech hlavních osách x , y , z mechanického napětí [2, 6]:

$$-\rho = \rho_1 = \rho_2 = \rho_3 \quad (4)$$

a zároveň poměrného prodloužení

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3, \quad (5)$$

$$\lambda = -\frac{\rho}{E}(1 - 2\mu\rho), \quad (6)$$

kde E je modul pružnosti, $\mu\rho$ – součinitel příčného stlačení (Poissonovo číslo).

1.1.1 Polovodičové tenzometry

Deformační charakteristika tenzometru je závislost poměrné změny odporu tenzometru na deformaci. Platí, že

$$\frac{\Delta R}{R_0} = C_1 \cdot \varepsilon_1 \frac{T_0}{T} + C_2 \cdot \varepsilon_1^2 \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 + C_3 \cdot \varepsilon_1^3 \left(\frac{T_0}{T}\right)^3 \quad (7)$$

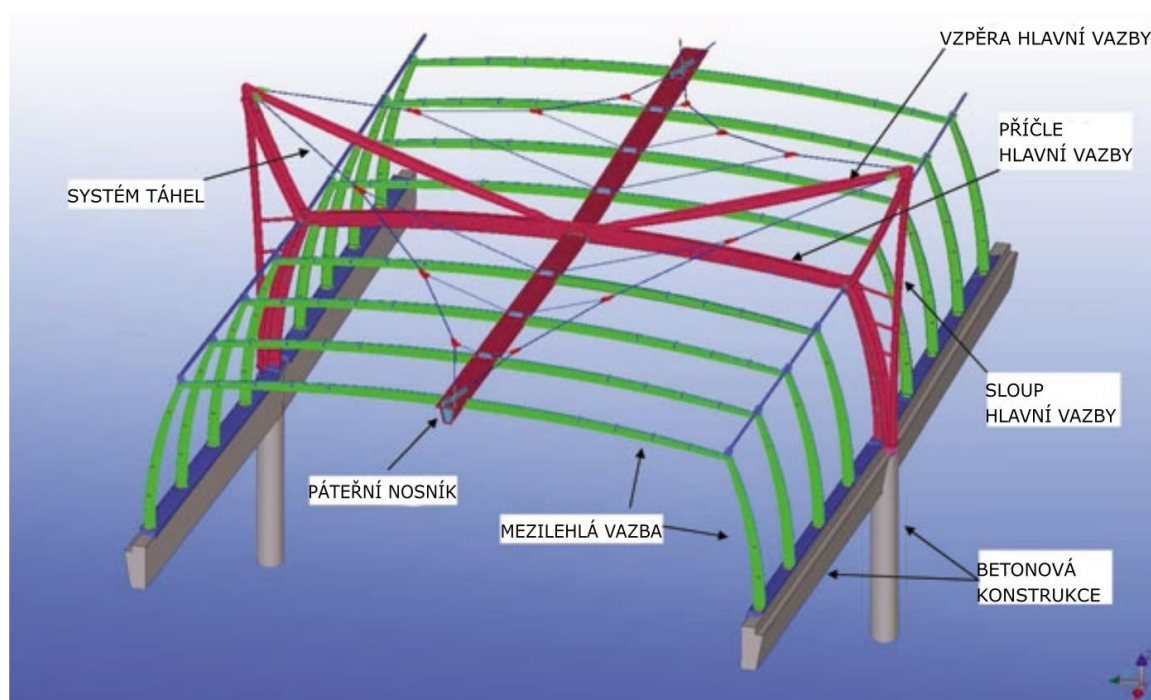
kde k , ε_1 , C a T jsou součinitelé závislé na měrném odporu tenzometru. Jestliže hodnota $C_3 \varepsilon_1^2$ nepřevyšuje 1 % hodnoty $\frac{\Delta R}{R_0}$, můžeme tento člen zanedbat.

1.3 Oblasti použití tištěných tenzometrů

Tenzometry se postupem času dostaly do mnoha aplikací. V následujícím textu je zobrazeno pár zajímavých aplikací a ukázka několika reálných použití tenzometrů z praxe a vývoje.

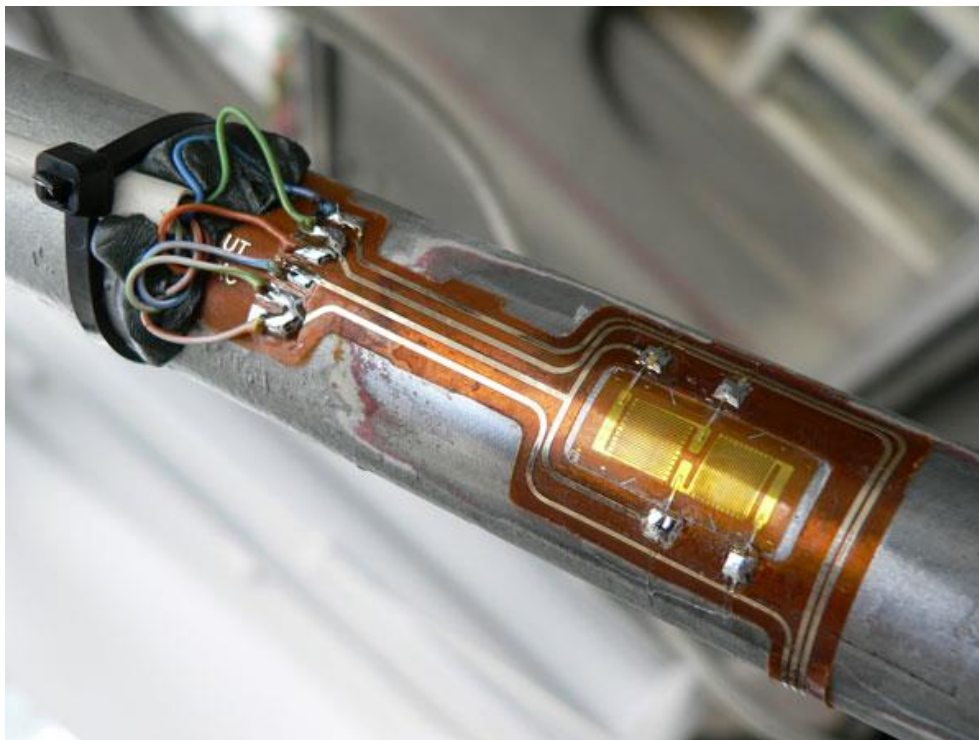
- **Aktivní měření ocelové konstrukce**

Zde je uveden příklad tisknutého tenzometru vytisknutého na flexibilní substrát a následná aplikace na ocelovou konstrukci. V tomto případě jsou zde na sedmdesáti táhlech aplikovány tisknuté tenzometry, kde jsou působící síly na ocelovou konstrukci monitorovány on-line. [13]



Obr. 11: Konstrukce protihlukového tunelu (převzato [13])

Tisknutý tenzometr zobrazený na Obr. 12 má kompaktní rozměry a lze ho jednoduše aplikovat i na rotační objekty, díky flexibilitě substrátu. Jediná nevýhoda aplikace je, že kabelový management v současné době zatím nelze řešit jinak, než jak je vyobrazeno na Obr. 12 (vizuálně to nepůsobí dobře). Připojení však zaručuje online sledování působení sil, a tedy lze okamžitě správně korigovat předpínací táhla nosníků už při stavbě konstrukce, aby nedošlo k trvalé deformaci konstrukce ani v budoucnu.



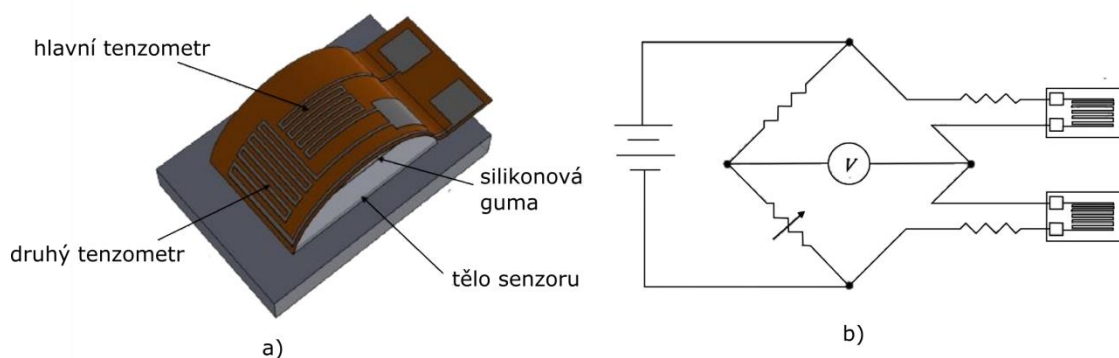
Obr. 12: Tenzometr aplikovaný na táhle (převzato [13])

- **Neinvazivní měření krevního tlaku**

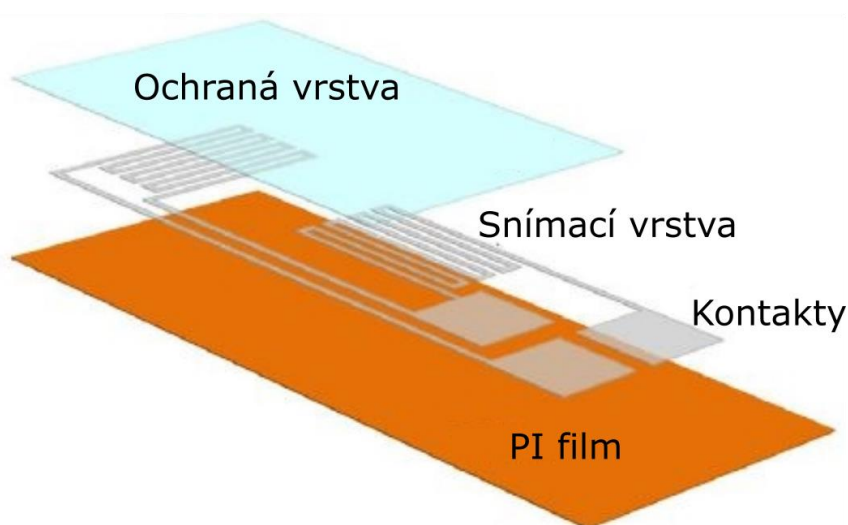
Kožní namáhání způsobené krevním tlakem na zápěstí bylo měřeno za použití nového dvojitého deformačního senzoru, jak je znázorněno na Obr. 13 a). Aby byla zajištěna lepší přesnost měření, je senzor s tištěným tenzometrem přiložen přímo na kůži v oblasti, kde se nachází tepna. [14]

Výstupní napětí na Wheatstonově můstku viz Obr. 13 b) indukované změnou odporu tenzometru pro stanovení krevního tlaku zápěstí je v desítkách mikrovoltů. Pro potlačení vysokofrekvenčního šumu je dvakrát propojený RC filtr složený ze dvou pasivních nízko průchodových filtrů spojených dohromady. Vzhledem k tomu, že rychlost lidského pulsu je v rozmezí od 40 do 180 tepů za minutu (odpovídá to 0,6 do 3 Hz [14]), mezní frekvence nízko průchodového RC filtru byla nastavena na 25 Hz [14]. Hodnota zisku nízko průchodového RC filtru pro tenzometr zápěstí byla vyhodnocena v experimentech. [14]

Tenzometr má dostatečnou adhezivní vrstvu, kde se bude dotýkat s pokožkou, aby nedocházelo k pohybu senzoru při pohybu. Konstrukce se skládá ze sítě dvou tiknutých tenzometrů, které jsou zapojeny do série. Tenzometry jsou navrženy tak, aby každý směřoval jiným směrem a bylo zaručeno přesnější měření. [14]



Obr. 13: Senzor s tištěnými tenzometry a), schéma dvojí tenzometru b) (převzato [9])



Obr. 14: Přehled senzoru multi-mode (převzato [14])

Tato aplikace tištěného tenzometru se nabízí jako skvělá možnost rozvoje takzvané “wearable“ (nositelné) elektroniky. Lze takto realizovat nepřetržité a velmi komfortní měření krevního tlaku v nemocnici, či domácí monitorování. Musí se ovšem zahrnout chyby měření, které jsou v jednotkách procent. Je-li naměřený tlak větší nebo menší než nastavená hranice odchylky, je potřeba tlak změřit klasickým způsobem.

- **Tištěné tenzometry v letectví a monitorování roztažnosti**

Tištěné tenzometry jsou flexibilní a lehký systém pro sledování stavu komponentů letadel. Tenzometry a jejich přípojné vedení, mohou být všechny vytištěny a integrovány na jeden pružný podklad. Tento tenký film je následně snadno integrován do nebo na cílovou strukturu bez velkého přidání hmotnosti. Tento systém umožní v reálném čase zajistit aktuální stav namáhání konkrétních částí letadla a umožňuje rychlou diagnózu klíčových konstrukčních prvků, jak při provozu tak při údržbě. Jako základní konstrukční

prvek je použit serpentinový inkoustový motiv, který převádí mechanické napětí na měřitelné piezoelektrické změny. Životnost a citlivost jsou do značné míry ovlivněny metodou tisku a substráty. [9]



Obr. 15: Strukturální testování křídel u letadel (převzato [15])

Vytištěné tenzometry díky své spolehlivosti a odolnosti lze používat i v odvětvích, které jsou závislé na bezpečnosti a životech lidí. Například i zmíněná letecká doprava. Avšak je potřeba dále zkoumat potřebné inkousty k tisknutí tenzometrů, co se teplotní závislosti týče, protože teplotní nestálost je v tomto odvětví veliká. [9]

2 Tiskové technologie vhodné pro tištěnou elektroniku

Tištěná elektronika - tento termín je znám již od padesátých let dvacátého století. K běžnému použití se tištěná elektronika dostala teprve nedávno a její vývoj bude ještě řadu let trvat. Tištěná elektronika je vhodná k tištění pasivních součástek (např. rezistory, kapacitory, atd.). Jde také použít k vytváření elektronických systémů a vodivých cest. Na základní substrát se nanese funkční materiály, které lze tisknout ve více vrstvách. Tištěná elektronika má řadu využití, například pro různé senzory plynu, tisknutí na ohebné substráty nebo tištěné baterie. [16] K její výrobě se používají technologie jako Sítotisk, Aerosol Jet nebo Ink-Jet. Těmito technologiemi se v následujících kapitolách tato práce zabývá. Tištěná elektrotechnika přináší mnoho výhod, asi nejdůležitější je vysoká rychlost a objem výroby, tisk na ohebné substráty, velmi nízká cena a efektivní nakládání s materiály s čímž také souvisí ochrana životního prostředí. [14, 15, 18]

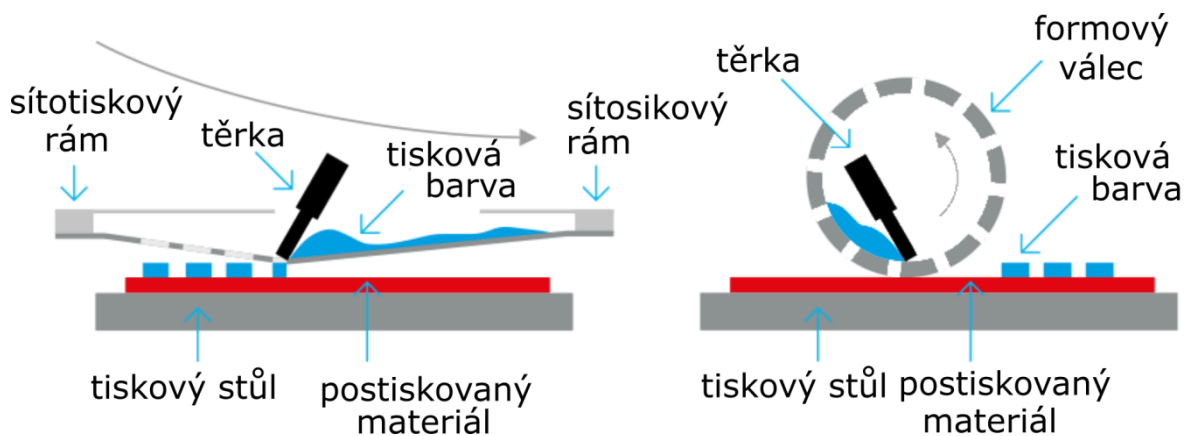
2.1 Technologie Sítotisk

Sítotisk je možné dělit na dvě základní odvětví. Grafický sítotisk (trička, mikiny atd.) a technický sítotisk (DPS, nepájivé masky, tištěná elektronika atd.). Sítotisk patří mezi základní metody výroby desky plošných spojů. Je poměrně rychlý a jednoduchý. Technologie sítotisku se používá v mnoha oborech a neustále se zdokonaluje [19]. Velký rozmach byl zaznamenán v posledních letech, kdy je jeho využití ve velkoformátovém a sériovém tisku vyplatí více než ostatní technologie. Sítotiskem lze nanášet vodivé i nevodivé vrstvy. [18] Lze tisknout na materiály se strukturovaným povrchem, stejně jako na materiály, které mají tvary rotačních těles. Tyto rotační tělesa potřebují speciální technologie, které nejsou levným ani flexibilním řešením. V elektrotechnice se nejčastěji setkáváme s tiskem na pevný substrát, ale lze tisknout i na flexibilní folie. Velmi často se sítotisk používá na potisk textilu. Každé sítotiskové zařízení obsahuje základní tři zařízení (rám, síto, třerka). [16]

Princip

Princip sítotisku je protlačování pasty skrz síto pomocí třerky. Základem pro sítotisk je síto z tkaniny nebo kovové mřížky, které je napnuto v rámu. Historicky se používaly rámy ze dřeva, dnes už pouze v hliníkovém nebo kovovém rámu z důvodu minimální deformace tvaru. Na síto je nanášena emulze ze světlo citlivého materiálu. Poté se nechá emulze vytvrdit. Jako další krok je aplikace filmu, podle něho se poté vytvoří vodivé či

nevodivé vrstvy na substrát. Světlo citlivá vrstva je osvětlena, pro dokonale ostré tvary je lepší použít bodový zdroj světla. Neosvětlená místa skrytá pod filmem na sítu se vymyjí. Tento krok zaručí, že se požadovaný materiál dostane pouze na požadovaná místa. Na hotové síto se aplikuje požadovaný materiál v pastovitém skupenství. Síto se položí v dané vzdálenosti (která se nazývá odtrh) nad substrát a třerkou v příslušném úhlu se protlačuje pasta prostupnými místy síta.



Obr. 16: Princip sítotisku, klasický (vlevo) a rotační (vpravo) (převzato [20])

Součásti systému

- **Síto**

Síta jsou základním a také nejdůležitějším prvkem, který ovlivňuje kvalitu tisku [21]. Jejich hlavním úkolem je nesení tiskové formy, zakotvené v mezi-vláknovém prostoru tkaniny, přes jehož otvory je protlačováno tiskové médium. Ostrost a jemnost převážně závisí na druhu použité síťoviny. [16] Aby bylo dosaženo požadované kvality, je také nutné zvolit vhodný druh síťoviny a jemnost rastru. Hustota síťoviny se může lišit dle požadované aplikace, oka jsou počítána jako počet ok/cm² (ok/inch²). Tvary bodů tedy ok, se rozlišují podle druhu rastru, na které je motiv rozložen. Dnes se obvykle využívají odlišné typy rastrů. [21] Jemnost rastru závisí na průměru respektive na druhu vlákna použitého síta. Jednotlivé dírky, kterým se říká rastrové body, se v současné době vyrábějí o jemnosti od 5 až 195 rastrových bodů [16] na jeden centimetr. [21]

Materiály používané v současnosti jsou tyto [16, 21]:

- **Polyamidové**

Vlákno se používá především tam, kde je potřeba místně pružné šablony. Tkanina je přibližně 2,5x pružnější, tažnější a lépe odolává abrasivním látkám oproti polyesterové tkanině. [16] Při použití nevadí vyšší protažení síta při tisku. Používá se právě tam, kde je zapotřebí pružné šablony odolné proti abrasivním barvám, a kde zároveň příliš nevadí

vyšší protažení síta při tisku. Jednou z hlavních oblastí pro využití sít z polyamidového vlákna je potisk keramiky.

- Polyesterové

Tkaninové vlákno je pevnější a chemicky odolnější než vlákno polyamidové, proto je používáno tam, kde je vysoký nárok na přesnost tisku a na životnost síta. [21]

- Kovové

Jako další možnost je tkanina metalizovaná polyesterová. Existují kovové sítě a metalizované sítě (tj. kovem ovrstvené polyesterové vlákno). Tato tkanina je kompromis vlastností polyamidu a polyesteru. Vlákna mají větší elasticitu než ocelová vlákna a v tahu jsou pevnější než polyesterová vlákna. Volbou metalizovaných vláken se nanáší menší tloušťka pasty, protože mají větší průměr vlákna, a tím projde menší množství pasty. Technické parametry tkaniny jsou předpokladem pro výslednou tloušťku nanesené pasty. Aby pasta správně prošla metalizovanou tkaninou, tak musí být zajištěna velikost částic pasty 2,5 až 3 krát menší než je velikost ok tkaniny. [21]

Důležitá vlastnost síťovin je pružnost. Pružnost zajišťuje, že ke kontaktu tiskové formy s potiskovaným materiálem nedochází jinde než v místě tisku. Síto se dotýká pouze v místě, kde se nachází těrka. [21]

Používané tkaniny v sítotisku mají různou hustotu vláken. Dle počtu vláken můžeme říci, že čím větší počet vláken je, tím jsou vlákna tenčí. Obecně lze tedy říct, že čím tenčí vlákna jsou, tím je síto pružnější. [21]

Tloušťka tkaniny výrazně ovlivňuje nános tiskového materiálu. V praxi to znamená, že čím má tkanina menší tloušťku, tím je nános tenčí a naopak. [www2] Obecně se dá říct, že tloušťka pasty je asi třetina tloušťky síta. Tloušťka naneseného materiálu hraje velkou roli ve výsledné aplikaci. [21, 16]

• Napínací zařízení

Kvalitní tisk může být zajištěn pouze tehdy, je-li správně napnutá tkanina v rámu. Napnutí je potřeba dodržet dle doporučených hodnot výrobce. Nutné je zajistit, aby napnutí bylo rovnoměrné. Celá plocha by měla mít stabilní napětí tkaniny. Pro zajištění těchto

požadavků bylo vytvořeno několik zařízení, která pracují na mechanickém nebo pneumatickém principu. Mechanický princip využívá k napínání mechanický tah. Pneumatický princip používá písty s tlakovým vzduchem. Pneumatický princip je oproti mechanickému výhodnější, protože nabízí větší a rovnoměrnější tah. Proto se v současnosti tento princip používá nejvíce. [21]

Tkanina musí být napínána s vlákny rovnoběžnými s napínacím rámem, kde se napětí zvyšuje postupně během 15 minut. Napětí je třeba měřit během napínání v obou osách a tkanina může být na rám přilepena až po ustálení napětí. K přilepení se nejčastěji používají dvousložková lepidla na bázi polyuretanu. U různých druhů tkanin časem dochází k různému poklesu napětí. Během prvních 4 hodin od přilepení do rámu dojde ke strmému poklesu napětí tkaniny a na výsledný stav se ustálí až po 48 hodinách. Proto se rámy nesmí používat hned po napnutí, ale nejdříve za 1 nebo 2 dny. [21]

- **Sítotisková šablona**

Sítotiskové šablony jsou vyráběny pomocí fotocitlivé emulze na síto (expozice, vyvíjení). Tato emulze vyplní síto, přičemž potřebná místa zůstanou volná (zůstanou průchozí). Vyrábějí se z tenkých nerezových folií laserem nebo leptáním. Motiv je vyroben fotolitografií. Šablony jsou o tloušťkách 100, 120 nebo 150 mikronů, dle požadované tloušťky natisknuté vrstvy. [16] Pomocí experimentů bylo stanoveno, že ideální úhel naklonění sítotiskové šablony a tisknutého motivu je 22,5 stupně. [22, 16]

Jsou 3 základní typy šablon [22, 16]:

- **Přímá** – nanesením emulze na oka, expozicí a vyvíjením. Výjimečná je svou životností (až 100 000 tisků) a je vhodná na opakované a dlouhé používání.
- **Nepřímá** – nanesením emulze ve formě listu a může být vyvíjena a exponována před aplikací na síto. Oproti přímé má menší životnost (2 000 až 4 000 tisků).
- **Kombinovaná** – šablona je kombinací předchozích dvou. Je vyrobená pomocí emulze ve formě listu, ale aplikuje se na síto před exponováním a vyvíjením. Výhodné je to, že lze zaplnit jenom část oka. Dobrá je též rozměrová stabilita a životnost v rozmezí 60 až 80 tisíc tisků.

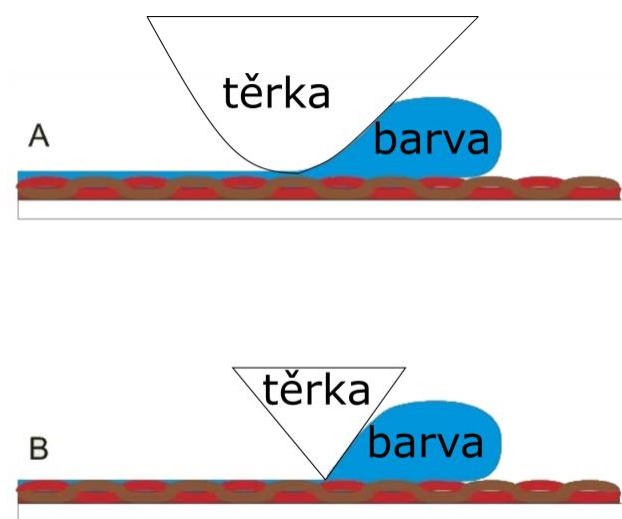
- **Sítotiskové pasty**

Sítotiskové pasty jsou pro sítotisk složité a nesourodé médium. Kvůli náročnosti vývoje a produkce past pro plošné spoje se jimi zabývá pouze několik společností na světě. Obsahuje sférické kuličky odlévané ve vakuu. Kuličky jsou obalené organickou směsí aktivátorů a pryskyřic. Tyto směsi zajišťují, že lepidla nezoxidují při skladování a rovněž zabezpečují optimální míru lepivosti. Pasta po určitou dobu plní úlohu lepidla. Pasty mohou být vodivé i nevodivé. [23]

Pasty používané v elektronice jsou složeny ze dvou složek. Organická, která má specifickou hustotu jako voda a kuličková složka PbSnAg, která má hustotu asi 8 krát větší. Využívá se středně, až poměrně hodně viskózní pasty. Jelikož se pasta deponuje skrz síto, viskozita tiskové pasty se může pohybovat zhruba mezi 500-5000 mPa.s [23] Dříve bylo používáno olovo, v současnosti převažuje cín s podílem stříbra a mědi. Miniaturní kuličky musí být ideálně sférické, kvůli nanášení pasty sítotiskem. Při potřebě použití složitějších materiálů jsou pasty nevhodné. [16] Směs se musí při nanášení neustále pohybovat, jinak hrozí riziko nekvalitní aplikace pasty. Při zdvihu šablony od substrátu se musí pasta perfektně oddělit. [17] [23]

- **Těrka**

Dalším důležitým nástrojem sítotisku je těrka. Zařízení, které má za úkol rozetřít pastu po sítu a vtláčit jí přes ovrstvené síto šablonou. Působením těrky dojde k aplikaci materiálu na potiskovaný substrát. Pro ideální přenos musí být zajištěna rovnost hrany těrky (viz Obr. 17 B), rovnoměrný pohyb, její geometrická přesnost a ostrost. [24]



Obr. 17: Ukázka tisku různými tvary těrek (převzato [24])

Těrky jsou nejčastěji vyráběny z polyuretanu nebo z kovu. Vlastnosti pasty a šablony ovlivňují výběr materiálu těrky. Výběrem kovové těrky se dosahuje velmi rovných vrstev tisku. Těrky jsou velmi odolné vůči poškození a není potřeba vyvíjet velký přítlak na síto. Avšak nevýhodou těchto terek je vysoká cena a opotřebování šablony je během používání rychlejší. Těrky z polyuretanu jsou vhodné pro nerovné nebo víceúrovňové šablony. Nevhodné jsou pro šablony s většími oky, protože z nich nabírají pastu. [16] Profily těrky se vyrábějí v různých profilech (viz Obr. 18) dle specifických vlastností a druhu použití. Tvrdost těrky je jeden z důležitých parametrů při výběru. Liší se dle tvrdosti stupnice Shore A. Nejběžnější tvrdost se pohybuje okolo hodnoty 75 Shore A napříč celým spektrem sítotiskových aplikací. [24, 16]



Obr. 18: Druhy terek (převzato [24])

Závěr

Technologie sítotisku má mnoho výhod. Mezi ně patří rychlost tisku, nízká cena tisku, jednoduchá obsluha, velkoformátový tisk. Sítotisk je vhodný k vytváření vícevrstvých zařízení. Právě díky těmto výhodám se tenzometry tisknou metodou sítotisku.

Z hlediska nevýhod se sítotisk řadí k jednodušším formám tisknutí. Je to zapříčiněno horší ostrotí natisknutých vrstev a problémové tisknutí past s vyšší viskozitou. Také nesnadnou a zdlouhavou výměnou motivů, nebo že spotřebuje více materiálu. V potaz se musí brát i opotřebení síta, s čím souvisí buďto náhodné poškození síta a menší životnost těchto sít. [16, 24]

2.2 Technologie Dispensing

Dispensing je kontaktní metoda, při které je pasta dodávána na substráty desek či obrobků aditivním způsobem nebo vytlačěním pasty ze zásobníku. K tomu se používají plné nebo duté jehly, na kterých je nanese pasta. [25] Tato metoda disponuje rychlostí aplikování až 15 000 bodů za hodinu v poloautomatické verzi a v plně automatické verzi lze až 40 000 bodů za hodinu [16]. Pro zvýšení rychlosti byla vyvinuta metoda bezkontaktního dispensingu (až 140 000 bodů za hodinu). [16] Metoda dispensing je široce používána v různých procesech v elektronickém průmyslu. [25]

Princip

Princip této metody spočívá v aplikaci pasty na substrát pomocí plné jehly, duté jehly nebo bezkontaktního dispensingu [16]. Popis těchto metod se nachází v následujících odstavcích.

- **Plné jehly**

Pokud není potřeba při výrobě vysoká četnost dávkování a přesnost, tak je vhodné použít plné jehly [16]. Plná jehla je připevněná v držáku. Ponořením jehly do zásobníku se na jehlu nanese pasta a poté se jehla přesune na místo určení, kde se dotkne substrátu. Dotekem je zajištěno, že pasta steče z jehly na substrát, kde se následně vytvoří ovrstvená plocha. Hloubkou ponoření jehly do zásobníku se určí množství pasty potřebné k nanesení na substrát. V úvahu potřeba brát také tvar jehly, tlaku a viskozitu pasty. Upnutím více jehel do držáku lze zvýšit rychlost, vhodné pro sériovou výrobu. [16]

- **Duté jehly**

Duté jehly jsou na rozdíl od plných jehel přesnější a používanější metodou dispensingu. Principem je, že požadované množství pasty je vytlačováno ze zásobníku skrze duté jehly. Jehla se pohybuje nad deskou a nanáší pastu na požadovaná místa. [25] Umístěním více jehel, stejně jako u metody plných jehel či zrychlením posuvu jehly, lze tento proces urychlit. Platí zde přímá úměra, čím více jehel, tím se metoda stane produktivnější, protože se jehly budou pohybovat pouze vertikálně a ušetří tím mnoho času. Vzdálenost substrátu od konce jehly a viskozita pasty jsou dva nejdůležitější parametry ovlivňující kvalitu tisku. [16]

- **Bezkontaktní dispensing**

Kvůli dosažení vyšší rychlosti dispensingu byl vyvinut bezkontaktní dispensing. Touto metodou byly odstraněny jehly a také údržba jehel. Snížili se náklady, zvýšila se rychlost a také opakovatelnost [16]. Vzdálenost mezi vypouštěcím otvorem a substrátem se pohybuje mezi 1 až 3,5 mm. [16] Nejčastější použití bezkontaktního dipensingu je při aplikace lepidel. [16]

Metodu dispenzing lze použít k vytvoření tenzometru. Je však nutné použít speciální 3D dispenzery, které umí nanášet vodivé pasty na 3D povrchy tj. přímo tisknuté tenzometry.

2.3 Technologie Ink-jet

Inkoustový tisk je považován za mnohostranný výrobní nástroj pro aplikace ve výrobě materiálů vedle své tradiční role v grafickém výstupu a značení. Je to aplikace inkoustového tisku pro konstrukční nebo funkční materiály, což vyžaduje pochopení toho, jak pracují při inkoustovém tisku různé kapaliny a jaké mají vlastnosti. [26]

Technologie ink-jet je bezkontaktní způsob nanášení inkoustu přímo na substrát [19]. V tomto aditivním procesu je možno velice přesně reprodukovat tisk malého množství materiálu (1-100 pikolitrů na substrátu před vysušením) [26]. V současnosti existují dva odlišné mechanismy, kterými technologie ink-jet vytváří tištěné motivy, které jsou známé jako "kontinuální inkoustové" (CIJ) a "drop-on-demand" (DOD) [18, 19, 17]

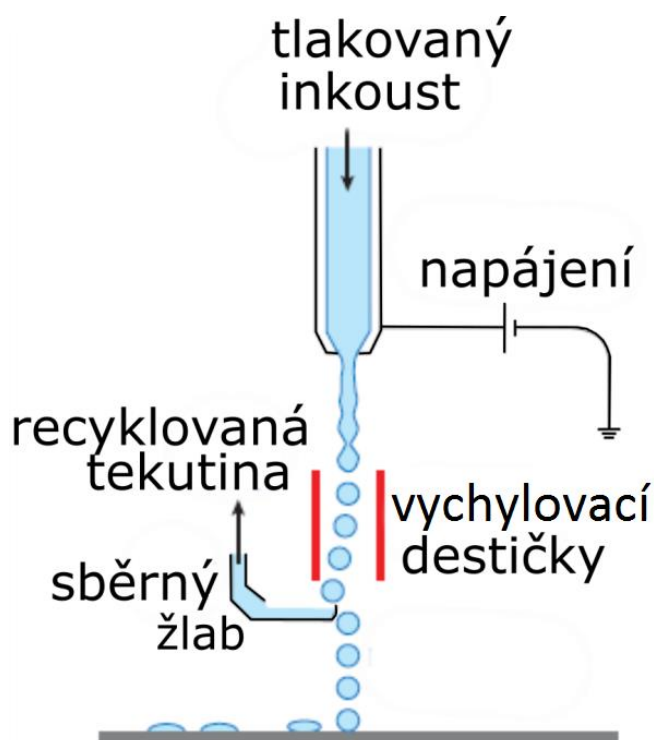
Tato technologie se již řadu let používala v elektrotechnických laboratořích. Rovněž se postupně začala používat v běžných tiskárnách v domácnostech. Ink-jet lze použít například na výrobu tištěné elektrotechniky. Konkrétně se ink-jet využívá k tištění kapacitorů nebo induktorů [29], tištění senzorů plynů [30], tranzistorů a také na tištěné tenzometry. [31]

Princip

- **CIJ – kontinuální metoda**

Tato metoda využívá nepřetržitého proudu inkoustu. Každá kapka je v tiskové hlavě nabita na nenulový potenciál vůči zemi. Poté je kapka za pomoci vychylovacích destiček, umístěných na okraji tiskové hlavy, směřována na svou pozici. [30] Metoda CIJ

je určena hlavně k rychlému tisku. Frekvence generování kapek může dosahovat od 20 až 60 kHz a rychlost tisknutí může dosahovat až 10 m/s. [26] Principem této metody, jak už z názvu vyplývá, je kontinuální proud inkoustu. To neumožňuje zastavení inkoustu ani v místech, kde se nanesení nepožaduje. Tímto vzniká vysoká produkce odpadu. Přebytný inkoust se pomocí elektrostatického náboje dostane do odpadní nádoby, odkud ho lze recyklovat. Nerecyklování přebytného inkoustu či pasty s drahými aditivami, například se zlatými či platinovými částicemi, by znamenalo velké finanční ztráty a také možný negativní dopad na životní prostředí. [17, 19]

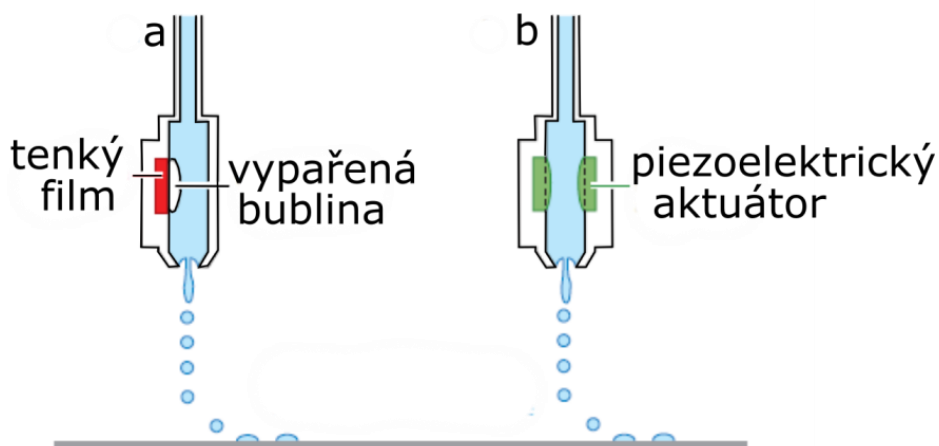


Obrázek 19: Princip CIJ [26]

- **DOD – drop on demand**

Tento typ tisku používá mechanického posuvu, kde se hlava s tryskou přesune nad požadované místo na substrátu. Tryska drží inkoust do momentu, než dostane řídicí signál. Po přijetí řídicího signálu se v trysce vyvine tlak a dojde ke generaci kapky na substrát. Jako dávkovací ventil se obvykle používá piezoelektrický aktuátor, který při příchodu proudového signálu uzavře trysku, viz Obrázek 19b). Jako druhý typ ventilu lze použít tenkovrstvý rezistor, který působením proudu vypaří inkoust v trysce a po skončení signálu zase cestu uvolní, viz Obrázek 19 a). [32] Na rozdíl od kontinuálního tisku vytváří princip DOD menší kapky než kontinuální tisk. Menší kapky při tisku umožňují vyšší přesnost a

technické požadavky na inkoust se snižují. Kapky jsou generovány rychlostí 1 až 20 kHz. [17, 16]



Obrázek 19: Princip DOD [26]

Materiály inkoustů

Lze použít klasické inkousty známé z tiskáren. Inkousty musí však mít základní funkční požadované vlastnosti pro zvolenou metodu tisku. Takzvané funkční inkousty mohou obsahovat dvě základní složky, kapalnou a dispergovanou složku. Hlavní složka je kapalná, může jí být například voda nebo organické rozpouštědlo. [26] Volbou kapalnou složku se určuje požadovaná viskozita, povrchové napětí nebo smáčivost. Tyto parametry se volí dle použité tiskové hlavy a použitého substrátu. Druhá základní složka inkoustu je složka funkční. Může být ve formě nanočástic v dispergované kapalnou složce inkoustu. [33]

Inkousty se mohou skládat z jedné či více složek a obvykle obsahuje rozpustné i nerozpustné částice. Je potřeba použít inkoust kompatibilní se substrátem, aby nedošlo k poškození substrátu. Důležité jsou také dobré adhezní vlastnosti inkoustu.

V případě aplikace vodivých vrstev se obvykle používají inkousty s vodivými kovovými nanočásticemi. Nanočástice jsou smíchané (rozdispergované) s rozpouštědly. Obvykle se používají stříbrné nebo zlaté částice, kvůli lepší vodivosti a odolnosti proti oxidaci. Měď je zde používána pouze výjimečně kvůli z důvodu oxidace a nutnosti speciálních (drahých) vytvrzovacích systémů fotonického sinterování. Nanočástice jsou použity z důvodu nižší teploty spékání. [26]

Závěr

Technologie ink-jet má široký rozsah uplatnění. Oba zde představené principy tisknutí mohou produkovat tekuté kapky s průměry v rozmezí od 10 do 150 μm [26].

Kontinuální ink-jet (CIJ) je hojně používán v průmyslovém kódování a značení, kde se klade důraz na zásadní rychlost tisknutí. Také je vhodná pro tištění, kde je méně jemných motivů (okolo 100 μm).

Princip tisknutí "drop-on-demand" (DOD), jak bylo výše zmíněno, není potřeba k tisknutí vychylovacích destiček. To znamená, že tento princip je přesnější a dominuje v grafice, tisku textu, nebo v nanášení funkčních materiálů. Je tedy vhodný k tisknutí různých senzorů plynů, par, či detektor alkoholu. [18, 26]

Technologie ink-jet se může využívat pro kusové tenzometry, různé specifické díly, výzkumné laboratoře a vývoj.

2.4 Technologie Aerosol jet

Aerosol jet je technologií průlomovou. Technika tisknutí a použité technologie umožňují jemnější tisknuté motivy než je to u tradičních technik ink-jet nebo sítotisku. [35] Z tohoto důvodu se dnes spousta institucí zabývá touto metodou tisku, jenž umožňuje prototypovou tištěnou elektroniku. Jedná se o bezkontaktní tiskovou technologii, která je založena na vytvoření aerosolu z tiskového materiálu. Daný materiál je následně při depozici aerodynamicky zaostřován na substrát. Aerosol jet umožňuje tisknout bezkontaktně na 3D povrchy velmi tenké linie (od 10 μm šířky), které mohou mít velmi malou vzájemnou rozteč (od 20 μm). [36] Technologie aerosol jet nachází velké využití pro širokou škálu různých materiálů (vodivé, dielektrické, biologické, nanočástice apod.) a širokou škálu substrátů bez konvenčních masek nebo tenkých filmů. Technologie byla vyvinuta společností Optomec v rámci projektu agentury obrany pro pokročilé výzkumné projekty USA (DARPA). [35]

Princip

Princip aerosol jet tisku je vytváření aerosolu z funkčního inkoustu a jeho následnou depozicí na substrát. [29, 30] Důležitá součást systému, kde je aerosol vytvářen,

se nazývá atomizér. U atomizéru lze volit mezi dvěma druhy, ultrazvukovým a pneumatickým.

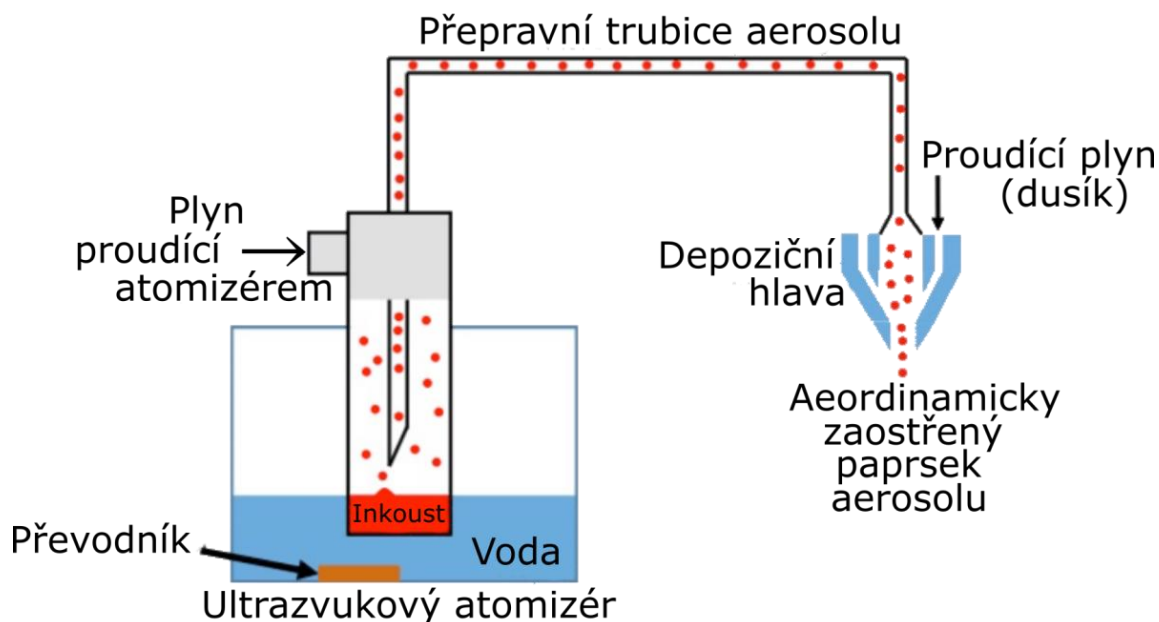
- **Pneumatický atomizér**

Pneumatický atomizér vytvoří z inkoustu hustý aerosol kapiček (1 až 5 mikronů), který pod tlakem a vysokou rychlostí plynu rozprašuje inkoust pomocí trysky na stěnu nádoby. Vzniknou-li příliš velké kapky, spadnou zpět do nádoby. Kapičky vhodné velikosti dále postupují ve formě aerosolu do depoziční hlavy. [35, 38]

- **Ultrazvukový atomizér**

Ultrazvukový atomizér používá zvukové vlny o vysoké frekvenci (obvykle 1,6-2,4 MHz) [35] k vytvoření aerosolu, ve kterém vysokofrekvenční vlny působí na inkoust. Inkoust je umístěn v nádobě, která je ponořena ve vodě (destilované) nad piezoelektrickým převodníkem. Vlny generované převodníkem se přenáší do nádoby s inkoustem, kde vlny s amplitudou určité velikosti rozbijí strukturu inkoustu, čímž se malé kapičky začnou odpoutávat do vzduchu a proud plynu tyto kapky dopraví do depoziční hlavy.

Kapky inkoustu vytvořené v atomizéru jsou následně proudem plynu transportovány do depoziční hlavy. V depoziční hlavě je aerosol obklopen prstencovým usměrňovacím proudem plynu (dusík). Proud plynu usměrní aerosol do velmi úzkého zaostřovacího paprsku. Obalový plyn působí nepřímo jako zaostřovací mechanismus zabírající vnější část průtokové trubice. V depoziční hlavě jsou využívány trysky s průměrem mezi 100 a 300 μm [35]. Usměrněným proudem aerosolu opouští hlavu rychlostí 10 až 100 m/s [35], kde se nanáší na připravený substrát. Vysokou rychlostí a zaostřením paprsku je možné, aby mohl být relativně velký rozestup mezi tiskovou hlavou a substrátem v rozmezí od 1 do 10 mm [27]. Technologie Aerosol Jet umožňuje tisknutí velmi jemných a přesných motivů a to i na nerovné substráty. [27, 30, 35]



Obr. 20: Princip Aerosol jet [39]

Materiály

Pro technologii aerosol jet je možné použít širokou škálu inkoustů a jiných tekutých látek. Důležité parametry jsou velikosti částic a viskozita. Aerosol jet může používat velikosti částic až 500 nm a viskozitu od 1 do 1000 mPa·s. Pro výrobu aerosolu je důležitá správná volba atomizéru, čímž se určí vhodná viskozita potřebného materiálu. Obvykle používané materiály pro vodivé inkousty jsou nanočástice stříbra, zlata, platiny, mědi či polymerů. Mohou to být i speciální funkční roztoky iontových kapalin a enzymů. Nejčastější volba používaného materiálu pro vodivé struktury je stříbro. [32, 30]

Substrát pro technologii aerosol jet je omezen jen kompatibilitou s použitým funkčním inkoustem. Velký benefit, co se ukrývá v této tiskové technologii, je možnost tisku na nerovné či 3D substráty. [38]

Výhody a nevýhody

Nespornou výhodou metody tisku aerosol jet je tištění velmi jemných motivů a relativně malá spotřeba tiskového materiálu. Tisknuté linie mohou mít šířku od 10 μm až po několik milimetrů. Tloušťka tisknutí se pohybuje od desítek nm, dle použitého inkoustu. Tyto vlastnosti lze využít k dalšímu kroku při návrhu a tisknutí. Můžeme tedy zmenšit elektronické součástky a substrát, čímž zmenšíme celkovou plochu desky plošných spojů. [40]

Aerosol jet může využívat inkousty s širokým spektrem viskozit. U pneumatického atomizéru se může využít viskozit od 0,7 až do 1000 mPa·s, což neplatí u ultrazvukového atomizéru, kde je spektrum poněkud omezené od 0,7 do 10 mPa·s. Výhodou ultrazvukového atomizéru je velice nízká spotřeba vstupního materiálu, potřebuje pouze 1 ml. U pneumatické metody je to minimálně 30 ml. [35]

Využití

Technologií aerosol jet lze tisknout různé snímače, které mohou být realizovány jako flexibilní, ultratenké komponenty s rozsáhlou distribuovanou funkcí. Tištěné senzory mohou být aplikovány v mnoha směrech, jako například inteligentní štítky na potravinách a inteligentní textilie [41]. Poptávka tisku na flexibilní, hrubé nebo 3D substráty je značně stoupající [35, 36]. Zařízení aerosol jet se uplatňuje v oblasti výzkumu tištěné elektroniky, smart textilií, inteligentních obalů, flexibilních displejů a solárních článků. Tato technologie se také používá pro Rapid Prototyping na vytváření prototypů v laboratořích, výzkumných nebo vývojových centrech. [39]

Průmyslově se zařízení používá například pro tisk antén do mobilních zařízení, pro elektrodové struktury, schopnost tisknout organické vodivé materiály bez nutnosti přípravy speciální tiskové formulace, které dosáhnou velice jemné kvality (šířka pod 25 μm). Jedná se o technologii pro použití v širokém rozsahu elektroniky, lze aplikovat materiály (vodivé, dielektrické, biologické atd.) na mikrometr rozměru plochy. Vzhledem k tomu, že se jedná o bezkontaktní technologii, je vhodná pro použití na jakémkoliv planárním či nerovném, pružném či tuhém podkladu a dokonce i pro komplexní 3D povrchy. [35]

Aerosol jet je v současné době možné použít také pro tisk tenzometrů. Z finančního hlediska, ale není možné tisknout tenzometry ve velkých sériích. Výhoda této metody je, že lze tisknout prototypy tenzometrů. Může se jednat například o testování nových materiálů či prototypy nových topologií. Po řádném otestování takovéto součástky lze převést její návrh na velkosériovou výrobu například pomocí sítotisku. [38]

3 Diskuze

Aplikace tenzometrů byla a je především používána na mechanické zatížení velkých rozměrů. Tato technologie nepotřebovala tak složitý výzkum, hlavně co se týče rozměrů a provedení tenzometrů. Stačil jeden drátek ze správného materiálu a následně spojit jeho konce na voltmetr a sledovat výchylku. S nadcházející dobou se nároky na všechny elektrotechnické součástky, včetně tenzometrů, ztížily a bylo potřeba nového výzkumu, aby bylo možné aplikovat tenzometry do sféry tisknutí i mikro rozměrů.

Tenzometry jsou vhodné pro plošné měření. Při použití více tenzometrů, čímž se dosáhne daleko vyšší citlivosti, lze měřit větší plochy. Tištěné tenzometry mají výrazně vyšší přesnost oproti klasickým drátovým tenzometrům a vyznačují se vysokou přesností a životností. [9]

Klíčové vlastnosti pro moderní použití mají tenzometry, které jsou tištěné metodami aerosol jet, ink-jet nebo sítotiskem. Tiskne se serpentinovitý tvar tenzometru a testuje se teplotní citlivost, spolehlivost snímače v tahu a životnosti. Díky technologii aerosol jet můžeme vytisknout prototyp tenzometru, který dosud neexistuje. Takovýto prototyp je dále testován a po úspěšném testování a schválení je možné přenést tenzometr do sériové výroby sítotisku. Tímto procesem se sníží náklady. Substráty a inkousty se neustále vylepšují, aby bylo možno používat nízkonákladové a plošně tištěné tenzometry. [2]

V současné době je výzkum tenzometrů spojen s termínem smart textilií, takzvané “wearables“ (nositelné) technologie či v medicínské sféře. Natisknutý tenzometr se používá v medicínském prostředí, kde je úspěšně testován a používán. V aplikaci měření tlaku přináší senzor s natisknutým tenzometrem nesporné výhody. Neustále můžeme sledovat tlak pacienta a mít tak online informace o jeho stavu bez nutnosti manuálního měření. Senzor není doposud bezchybný, ale pokud nedojde k velkému výkyvu od mezních hodnot, lze ho používat bez nutnosti odstranění. Na operačním sále je využíván tenzometr natisknutý přímo na operačních nástrojích, který slouží chirurgům k lepšímu manipulování a použití sil stisknutí při operaci. Tato technologie se dostává ve výzkumu do klasického oblečení (kalhoty, trička, rukavice, atd.), kde je možné sledovat různé parametry lidského těla.

Tištěná elektrotechnika je technologie, která je v neustálém vývoji. Mezi nejstarší technologie tisku se řadí sítotisk. Jedná se o nejuniverzálnější a nejvíce prozkoumanou techniku, která prošla spousty inovacemi. Technika tisku je jednoduchá, ale doprovází ji náročná příprava síta. Sítotisk je v současné době nejvhodnější metodou pro sériovou výrobu.

Dispensing je nejjednodušší technika tisku pro přenos pasty, nebo lepidla. Používají se plné nebo duté jehly nebo bezkontaktní dispensing. Proces je možný urychlit pomocí použití více jehel, tím lze tisknout velké série.

Metody tisku ink-jet a aerosol jet jsou oproti sítotisku vhodné pro tisk na nerovný či rotační substrát, což je umožněno tím, že tiskové hlavy se nedotýkají substrátu přímo, ale jsou v pozici nad ním. U takového tisku je možné tisknout miniaturní 3D konstrukce, u sítotisku nikoliv. Množství potřebného inkoustu (past) k tisknutí je také úspornější než sítotisk. Technologie ink-jet i aerosol disponují možností rychlé změny návrhu tiskových motivů (tvar, počet apod.) pomocí použití programů CAD. Nevýhodou těchto dvou metod naopak je, že v současné době nelze tisknout vyšší rychlostí než u sítotisku. Objevuje se zde problém se zasycháním inkoustu v tiskové hlavě a dochází k ucpávání tiskových trysek.

Z výše zmíněných technologií patří aerosol jet mezi nejmladší a zároveň využívá výhody obou technologií a jejich nedostatky se snaží vylepšit. Ink-jet je do jisté míry velice podobnou technologií, které se nedotýkají substrátu a umí tisknout na nerovný povrch. I přesto však aerosol jet nabízí oproti technice ink-jet, při srovnatelné rychlosti a přesnosti tisku mnohem, mnohem větší variabilitu.

Sítotisk, ink-jet a aerosol jet mohou vytvářet vodivé i nevodivé struktury. Materiály, které používají, jsou obdobné, pro všechny zmíněné technologie. Obvykle se jedná o částice mědi, zlata, stříbra či uhlíku.

Technologie pro tištěnou elektrotechniku se neustále vyvíjí. V současnosti jsou tyto technologie součástí jedné z nejdynamičtěji rostoucích oblastí obchodu a průmyslu. Cílem jsou nízkonákladové, ergonomické, lehké a často i recyklovatelné výrobky.

Závěr

V bakalářské práci byl čtenář seznámen s tenzometry a technologiemi, které jsou vhodné pro výrobu tištěných tenzometrů, tisknutelné elektroniky a jejich použití.

V první části jsou popsány tenzometry. Je zde uvedena historie, základní aplikace a principy tenzometrů. Dále jsou zde uvedeny hlavní materiály tenzometrů používané v minulé i současné době. Tištěné tenzometry mají univerzální použití a mohou být aplikovány na nespočet míst, kde je potřebné znát pružnost či deformace materiálu. Zmíněné oblasti použití jsou vybrány z mnoha již použitých aplikací. Výrobci tištěných tenzometrů aktivně zkoumají různé materiály inkoustů a substrátů, aby bylo dosaženo nejlepších výsledků měření.

Technologie tisku neoddělitelně souvisí s výrobou tištěných tenzometrů. V následné části práce jsou popsány reálné metody výroby tištěných tenzometrů, či tištěné elektroniky obecně. Doposud nejvíce využívanou technologií pro výrobu tenzometrů je sítotisk. Touto metodou se mohou tenzometry vyrábět ve velkém počtu a sériích. Metoda tisku je velmi jednoduchá, avšak musí se používat správné speciální vodivé pasty. Navržený tenzometr musí splňovat definované parametry, proto je potřeba znát správný postup při jeho výrobě. Celkovou funkci měřicího systému a přesnost měření ovlivňuje ve velké míře i kvalita tisku tenzometru.

Dále jsou v práci popsány technologie ink-jet a aerosol jet. Jsou to moderní bezkontaktní technologie tisku. Umožňují tisk tenzometrů a elektronických součástek na flexibilní substráty. Nevýhodami těchto technologií jsou v současné době používané drahé materiály a ink-jet nelze používat pro sériovou výrobu. Velké plus těchto technologií je oproti sítotisku využití velmi malého množství materiálu, možnost tisknutí 3D struktur a vhodné pro rapid prototyping.

V dohledné době se předpokládá, že tištěná elektronika, včetně tenzometrů, bude součástí života každého člověka. Může se jednat o nositelnou elektroniku, integraci prvků do smart textilií nebo implementování senzorů přímo na pokožku. Vývoj tištěných flexibilních tenzometrů je teprve na začátku, ale již v dnešní době se s nimi můžeme setkat v běžném životě.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] K. Zehnula, “Snímače neelektrických veličin,” vol. 8, p. 382, 1977.
- [2] K. Hoffmann, “Practical hints for the installation of strain gages,” Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, p. 56, 1996.
- [3] DERBY, Brian. Inkjet Printing of Functional and Structural Materials [online]. 2010, roč. 40, č. 1, s. 395–414. ISSN 1531-7331. [cit. 2018-05-12] Dostupné z: doi:10.1146/annurev-matsci-070909-104502.
- [4] K. Hoffmann, “An Introduction to Measurements using Strain Gages,” Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, p. 257, 1989.
- [5] J. Vepřek, “Uhlíkové a polovodičové snímače velmi nízkých teplot,” vol. 7, p. 212, 1968.
- [6] C.-Y. Huang and K.-C. Ying, “Applying strain gauges to measuring thermal warpage of printed circuit boards,” *Measurement*, vol. 110, pp. 239–248, Nov. 2017.
- [7] Automatizace/senzorika [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>.
- [8] Omega.com [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <https://www.omega.com/literature/transactions/volume3/strain.html>.
- [9] Y. Zhang, N. Anderson, S. Bland, S. Nutt, G. Jursich, and S. Joshi, “All-printed strain sensors: Building blocks of the aircraft structural health monitoring system,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 253, pp. 165–172, 2017.
- [10] Strain Gauges [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://www.continuummechanics.org/straingauges.html>.
- [11] B. Ando and S. Baglio, “All-Inkjet Printed Strain Sensors,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 12, pp. 4874–4879, Dec. 2013. [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: 10.1109/JSEN.2013.2276271
- [12] V. Beran, J. Gírl, and O. Tůmová, “Měření neelektrických veličin,” p. 187, 1994.
- [13] C. I. J. L. Ing. Vladimír Janata, Konstrukce protihlukového tunelu na Městském okruhu v Hradci Králové, Excon, a.s, p. <https://www.casopisstavebnictvi.cz/tisk.php?ID=2106>.
- [14] Hay, Gareth I Evans, Peter S.A. Harrison, David J Southee, Darren Simpson, George Harrey, Paul M. Characterization of lithographically printed resistive strain gauges [online]. 2005, 864-870 [cit. 2018-05-27]. DOI: 10.1109/JSEN.2005.845209. ISSN 1530437X.
- [15] The Marsh Group [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: http://www.marshinst.com/instrumentation_services-14.html.
- [16] J. Mach, P.; Skočil, V.; Urbánek, “Montáž v elektrotechnice,” Vydav. ČVUT Praha, 2001.
- [17] M. Janáč, “Technologie tisku pájecí pasty,” 2011. Bakalářská práce.
- [18] Sítotisk – technika vhodná, Patrik Thoma [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=548.
- [19] Tomáš Neuhofer, “Technologie výroby tištěné elektrotechniky,” 2015. Bakalářská práce.
- [20] Print Media Academy [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: https://www.polygraficketahaky.cz/tiskove_techiky.
- [21] THOMA, Patrik. Svět tisku: Sítotiskové rámy a síťovina [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=1717.
- [22] THOMA, Patrik. Svět tisku: Osvět sítotiskové šablony [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=2041.

- [23] KONEČNÝ, Gustav. Svět tisku: Sítotisk při výrobě desek plošných spojů [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=3806.
- [24] THOMA, Patrik. Svět tisku: Sítotiskové těrky [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=2114.
- [25] Daniel Xiongbiao Chen. MODELING AND OFF-LINE CONTROL OF FLUID DISPENSING FOR ELECTRONICS PACKAGING [online]. Saskatoon: Department of Mechanical Engineering University of Saskatchewan, 2002, s. 80-120. DOI: 10.1109/JSEN.2005.845209.
- [26] Derby, Brian. Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution [online]. 2010, 395-414 [cit. 2018-05-27]. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070909-104502. Dostupné z: <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-matsci-070909-104502>
- [27] Perelaer, Jolke De Gans, Berend Jan Schubert, Ulrich S. Ink-jet printing and microwave sintering of conductive silver tracks [online]. 2006, , 2101-2104 [cit. 2018-05-27]. DOI: 10.1002/adma.200502422. ISSN 09359648. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.200502422>
- [28] Ando, Bruno Baglio, Salvatore. Inkjet-printed sensors: a useful approach for low cost, rapid prototyping [Instrumentation Notes] [online]. 2011, , 36-40 [cit. 2018-03-29]. DOI: 10.1109/MIM.2011.6041380. ISSN 1094-6969. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6041380/>
- [29] Michelis, Fulvio Bodelot, Laurence Bonnassieux, Yvan Lebental, Bérengère. Highly reproducible, hysteresis-free, flexible strain sensors by inkjet printing of carbon nanotubes [online]. 2015, 1020-1026 [cit. 2018-02-13]. DOI: 10.1016/j.carbon.2015.08.103. ISSN 00086223.
- [30] Kim, Yong Hoon Kim, Kwang Ho Oh, Min Suk Kim, Hyun Jae Han, Jeong In Han, Min Koo Park, Sung Kyu. Ink-jet-printed zinc tin oxide thin-film transistors and circuits with rapid thermal annealing process [online]. 2010, , 836-838 [cit. 2018-02-13]. DOI: 10.1109/LED.2010.2051404. ISSN 07413106.
- [31] Singh, Madhusudan Haverinen, Hanna M. Dhagat, Parul Jabbour, Ghassan E. Inkjet printing-process and its applications [online]. 2010, 673-685 [cit. 2018-02-13]. DOI: 10.1002/adma.200901141. ISSN 09359648.
- [32] de Gans, B.-J. Duineveld, P. C. Schubert, U. S. Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future Developments [online]. 2004, 203-213 [cit. 2018-02-13]. DOI: 10.1002/adma.200300385. ISSN 0935-9648. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.200300385>
- [33] Perelaer, By Jolke de Laat, Antonius W. M. Hendriks, Chris E. Schubert, Ulrich S. Inkjet-printed silver tracks: low temperature curing and thermal stability investigation [online]. 2004, , 3209 [cit. 2018-02-13]. DOI: 10.1039/b720032c. ISSN 0959-9428. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=b720032c>
- [34] B. Melichar, "Výrobní technologie pro tištěnou a flexibilní elektroniku," 2013. Bakalářská práce.
- [35] Soukup, Radek Navratil, Jiri Reboun, Jan Rericha, Tomas. A comparison of the interdigital electrodes prepared by aerosol jet printing and lift-off technique [online]. 2015, 30-35 [cit. 2018-05-27]. DOI: 10.1109/ISSE.2015.7247956. ISSN 21612536.
- [36] Navrátil, Jiří. Aerosol Jet ® bondování SMD součástek Aerosol Jet ® SMD components bonding [online]. 2015 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/26515> [37] "OPTOMEK. Aerosol Jet ® Printed Electronics Overview [online]. ©2014. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/wp->

- content/uploads/2014/04/AJ_Printed_Electronics_Overview_whitepaper.pdf.”
- [38] NAVRÁTIL, Jiří (ed.). Možnosti systému Aerosol Jet®. In: FIRT, Jaroslav. Elektrotechnika a informatika 2015: Sborník konference. První. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015, s. 87-90. ISBN 978-80-261-0514-5.
- [39] Thompson, Bradley Yoon, Hwan Sik. Aerosol-printed strain sensor using PEDOT:PSS [online]. 2013, 4256-4263 [cit. 2018-05-27]. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2264482. ISSN 1530437X. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/26515>
- [40] KOROTCENKOV, G. Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice? Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology [online]. 2007, roč. 139, č. 1, s. 1–23. ISSN 09215107. Dostupné z: [doi:10.1016/j.mseb](https://doi.org/10.1016/j.mseb).
- [41] Soukup, Radek Navratil, Jiri Reboun, Jan Rericha, Tomas. A comparison of the interdigital electrodes prepared by aerosol jet printing and lift-off technique [online]. Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC), 2014, 2014 [cit. 2018-05-27]. DOI: 10.1109/ESTC.2014.6962821. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/26515>
- [42] Hedges, M., Marin, A.B. 3D Aerosol Jet printing for microelectronics applications’, Advancing Microelectronics [online]. Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC), 2014, 2014, 26-30 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <https://goo.gl/j3VAFE>
- [43] Blumenthal, T., Fratello, V., Nino, G., ‘Conformal printing of sensors on 3D and flexible surfaces using Aerosol Jet deposition’, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2013, 8691, art. no. 86910P. [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: DOI: 10.1117/12.2009278.