

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Funkční struktury realizované metodou Aerosol Jet**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan RŮŽIČKA**  
Osobní číslo: **E16N0024P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Funkční struktury realizované metodou AerosolJet**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Teoreticky popište principy a způsoby depozice nanočásticových materiálů se zaměřením na selektivní bezkontaktní metody
2. Seznamte se s depozičním zařízením AerosolJet včetně zvládnutí jeho obsluhy
3. Navrhněte vhodné motivy pro realizaci funkčních struktur metodou AerosolJet
4. S využitím dostupných nanočásticových materiálů realizujte Vámi navržené funkční struktury
5. Proveďte charakterizaci realizovaných struktur a kriticky zhodnoťte dosažené výsledky

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. **Manuál k zařízení Aerosol Jet system**
2. **Maurice H. Francombe, John L. Vossen; Physics of Thin Films: Advances in Research and Development 2016**
3. **John L. Vossen; Thin Film Processes 2012**
4. **Elektronické informační zdroje**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Štulík, Ph.D.**

Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**

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



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

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na funkční struktury realizované metodou Aerosol Jet. Hlavním cílem práce je navrhnout, vyrobit a otestovat teplotní senzor na vlákně. První část diplomové práce se věnuje metodám nanášení nanomateriálů, obzvláště technologii Aerosol Jet. Ve druhé části je popsán současný stav teplotních senzorů na vlákně. Experimentální část popisuje návrh, použité materiály a výrobu teplotního senzoru na vlákně. Výsledky měření v klimatické komoře ukazují, že vytvořený senzor disponuje dobrými dynamickými vlastnostmi, opakovatelností a malou závislostí na relativní vlhkosti. U senzoru je pozorován záporný teplotní koeficient. Tištěné senzory s uvedenými vlastnostmi by mohly být dalším krokem k implementaci elektroniky do textilií, použitelných ve smart textiliích nebo ve zdravotnictví.

## **Klíčová slova**

Aerosol Jet, vodivý inkoust, tištěná elektronika, nanočástice, senzor na vlákně

## **Abstract**

This diploma thesis is focused on functional structures implemented by Aerosol Jet system. The main aim of this work is to design, produce and test temperature sensor on yarn. The first part deals with methods of deposition of nanomaterials, especially with the Aerosol Jet technology. In the second part is described state of the art of temperature sensors on yarn. The experimental part describes design, used materials and manufacturing of a temperature sensor on yarn. The results of the measurement in the climatic chamber show that the printed sensor has a good dynamic properties, repeatability and low dependence on relative humidity. A negative temperature coefficient was observed. Printed sensors with mentioned properties could be a next step to implementation of electronics into textile, usable in smart textiles or health care.

## **Key words**

Aerosol Jet, conductive ink, printed electronics, nanoparticle, sensor on yarn

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 26.5.2019

Jan Růžička

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Štulíkovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu při psaní diplomové práce a při celém studiu.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 MOŽNOSTI BEZKONTAKTNÍ DEPOZICE NANOMATERIÁLŮ</b> .....	<b>12</b>
1.1 INKJET .....	12
1.2 E-JET PRINTING .....	14
1.3 DISPENSING .....	15
<b>2 SYSTÉM AEROSOL JET®</b> .....	<b>17</b>
2.1 PRINCIP SYSTÉMU .....	18
2.2 KVALITA TISKU .....	20
2.3 VÝHODY SYSTÉMU .....	22
2.3.1 Velikost nanášených linií .....	22
2.3.2 Široká škála materiálů .....	23
2.3.3 Tisk na 3D substráty .....	23
2.3.4 Jednoduchost a rychlost návrhu .....	24
2.3.5 Nízké výrobní náklady .....	24
2.4 SOUČASNÉ VYUŽITÍ SYSTÉMU AEROSOL JET .....	24
<b>3 TEPLOTNÍ SENZORY NA VLÁKNECH</b> .....	<b>27</b>
3.1 KONVENČNÍ TERMISTORY NA VLÁKNECH .....	27
3.2 TEPLOTU SNÍMAJÍCÍ TEXTILNÍ STRUKTURY .....	28
3.3 SENZORY NA BÁZI UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC .....	30
3.3.1 Senzory s čistými CNT .....	31
3.3.2 Senzory s kompozitem .....	31
3.4 SENZORY NA BÁZI GRAFENU .....	32
<b>4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>34</b>
4.1 NÁVRH SENZORU .....	34
4.2 POUŽITÉ MATERIÁLY .....	35
4.2.1 Substrát .....	35
4.2.2 Vodivá vrstva .....	36
4.2.3 Aktivní vrstva .....	36
4.3 VÝROBA SENZORU .....	37
<b>5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>43</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>46</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>48</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratek

\$/oz	dolar za unci
AJP	aerosol jet printing
ASIC	application specific integrated circuit – zákaznický integrovaný obvod
CAD	computer aided design
CIJ	continuous inkjet – princip technologie inkjet
CNT	carbon nanotube – uhlíková nanotrubička
CVD	chemical vapor deposition – chemická depozice z plynné fáze
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency – Agentura ministerstva obrany pro pokročilé výzkumné projekty
DMAC	d-methylacetamid
DNA	deoxyribonucleic acid – deoxyribonukleová kyselina
DOD	drop-on-demand – princip technologie inkjet
J/K	Joule na Kelvin
kHz	kilohertz
LED	light emitting diode – dioda emitující světlo
m/s	metr za sekundu
mA	miliampér
MHz	megahertz
ml	mililitr
mm	milimetr
mm/s	milimetr za sekundu
MPa	Megapascal
mPa·s	milipascal sekunda
mW	miliwatt
MWCNT	multi-walled carbon nanotube – vícestěnná uhlíková nanotrubička
nm	nanometr
NTC	negative temperature coefficient – negativní teplotní koeficient
PDMS	polydimethylsiloxan
PEDOT:PSS	poly(3,4-ethyldioxythiolen) polystyren-sulfonát
pH	potencial of hydrogen – vodíkový exponent
PMMA	polymethylmethakrylát
PVDF	polyvinylidenfluorid

---

rGO	reduced graphene oxide – redukovaný oxid grafenu
rpm	revolutions per minute – otáčky za minutu
RTD	resistance temperature detector – odporový snímač teploty
S/cm	Siemens na centimetr
SMD	surface mount device – součástka pro povrchovou montáž
sscm	standart cubic centimeters per minute – standartní kubický centimetr za minutu
SWCNT	single-walled carbon nanotube – jednostěnná uhlíková nanotrubička
TCR	temperature coefficient of resistance – teplotní součinitel rezistivity
TSF	temperature sensing fabric – teplotu snímající tkanina
UV	ultrafialové záření
W/m·K	Watt na metr krát Kelvin
wt%	procenta z váhy
μm	mikrometr
Ω/°C	ohm na stupeň Celsia
Ω/sq	ohm na čtverec
Ω·m	ohm metr

## Úvod

Začlenění elektroniky do běžného života je v současné době jedním z trendů v elektronice, implementace teplotních senzorů do textilií může ulehčit život mnoha lidem po celém světě. Ve zdravotnictví mohou pomáhat hlídat teplotu otoků pacientů s cukrovkou, hasičům při zásahu, kdy je jejich tělo vystaveno vysokým teplotám. Moderní technologie umožňují vytvoření miniaturních senzorů s vlastnostmi podobnými konvenčním zařízením. Tyto technologie jsou schopné tisknout senzory velikostí v řádech mikrometrů, umožňují použití flexibilních nebo nerovinných substrátů. Jednou z těchto technologií je Aerosol Jet, který díky svým unikátním vlastnostem nabízí zcela nové možnosti a perspektivy ve výrobě elektroniky. Jedná se o aditivní selektivní depoziční technologii, její hlavní výhody jsou možnost tisku na 3D substráty, zmenšení natištěných linií až na 10  $\mu\text{m}$  a použití široké škály funkčních materiálů a substrátů.

Práce je rozdělena do čtyř kapitol, v první kapitole jsou popsány některé technologie selektivní depozice materiálu na substrát. Na to navazuje představení technologie Aerosol Jet, detailně je popsán princip, jednotlivé části systému a jeho výhody. V další kapitole jsou představeny současné druhy teplotních senzorů na vláknech. Jsou zmíněny konvenční termistory na vláknech, teplotu snímající struktury a senzory na bázi uhlíkových nanotrubic a grafenu. Hlavní část práce se věnuje návrhu, výrobě a testování teplotního senzoru na vláknech. Je podrobně popsán celý postup výroby senzoru včetně použitých materiálů a jejich vlastností. Nakonec jsou zhodnoceny výsledky testování vytvořených senzorů.

# 1 Možnosti bezkontaktní depozice nanomateriálů

Řada průmyslových odvětví používá výrobu na bázi tisku, tradičně se tisk používá při výrobě novin či knih, ale v současnosti stále více i při výrobě elektroniky. Neustále jsou vyvíjeny nové technologie a materiály, s nimiž lze dosáhnout přesnosti tisku v mnohem menším měřítku než dříve. Tyto nové technologie se uplatňují při výrobě displejů, biočipů nebo nanášení funkčních vrstev. Vývoj nových tiskových technologií je motivován jedinečnými vlastnostmi materiálů, které se při něm používají. Jedná o takzvané nanomateriály.[1][2]

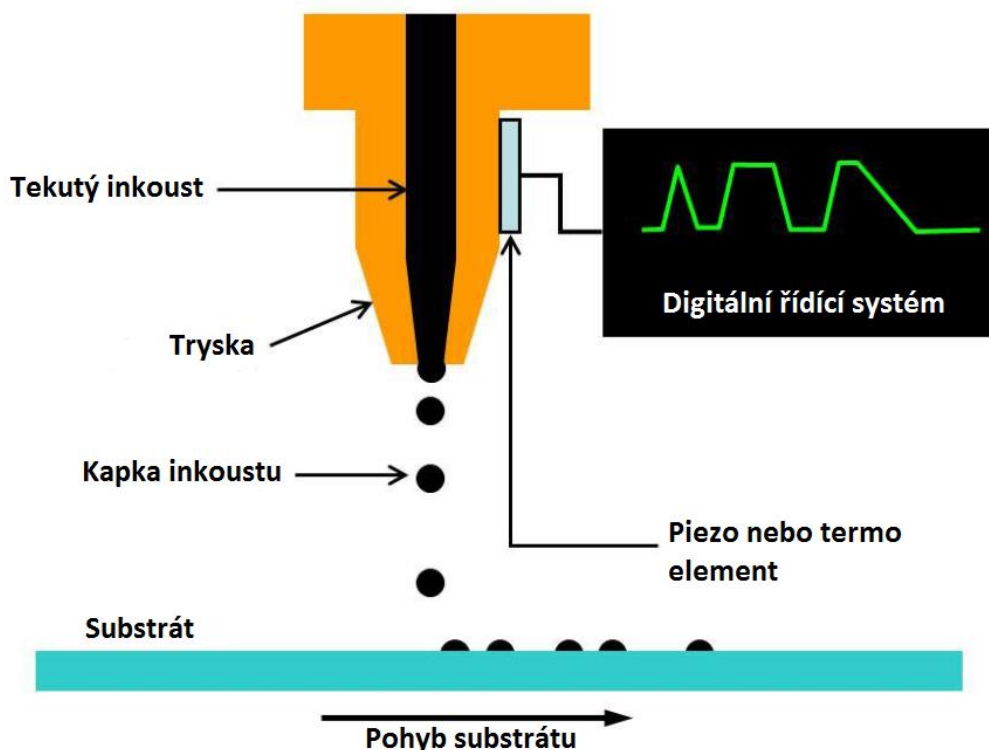
Nanomateriály mají výrazně odlišné vlastnosti oproti klasickým formám materiálů. Například zlaté nanočástice mají nižší teplotu tání než klasické zlato, což umožňuje depozici nanočástic zlata na mikroelektronické obvody, které pak mohou být sintrovány při relativně nízké teplotě. Tisk kovových a polovodivých materiálů je obzvláště důležitý pro výrobu flexibilní elektroniky. Nové technologie mají své uplatnění i v biotechnologii, převážně v biosenzorech a mikročipech. S rozvojem nových technologií se stává rozmanitější i nabídka materiálů, které lze tisknout. Základem pro elektroniku jsou kovové nanomateriály, jedná se o vodivé a polovodivé materiály, konkrétními zástupci jsou stříbro, zlato, platina a další. Tisknout se ale dají i dielektrické nebo adhezivní materiály, dokonce i biomateriály jako DNA či proteiny.[2]

## 1.1 Inkjet

Inkjet je v současnosti hojně využívaná metoda pro bezkontaktní depozici materiálu. Pomocí technologie inkjet je možno tvořit flexibilní a organickou elektroniku jako LED, tenkovrstvé tranzistory či biosenzory. Nejrozšířenějším komerčním použitím jsou inkoustové tiskárny. Inkjet pracuje buď na principu drop-on-demand (DOD) nebo continuous inkjet (CIJ). DOD se doslova dá přeložit jako „kapka podle potřeby“ a k dávkování inkoustu dochází jen podle předem nastaveného programu. Naopak u CIJ dochází k dávkování inkoustu nepřetržitě, přebytečný inkoust je odváděn do stavítka a je znovu využíván v systému. Existuje několik typů inkjet, lišící se principem vytvoření kapky inkoustu. Nejpoužívanějšími jsou piezoelektrický a termální inkjet.[1][2][3]

Piezoelektrický inkjet je založen na deformaci piezoelektrické keramiky. Napětí přivedené na keramiku vyvolává mechanické vibrace, které překonají povrchové napětí kapaliny a dojde k odtržení kapičky inkoustu. Velikost odtržené kapky se pohybuje v rozmezí od 5  $\mu\text{m}$  při 3,5 MHz až do 150  $\mu\text{m}$  při 7 kHz.[2]

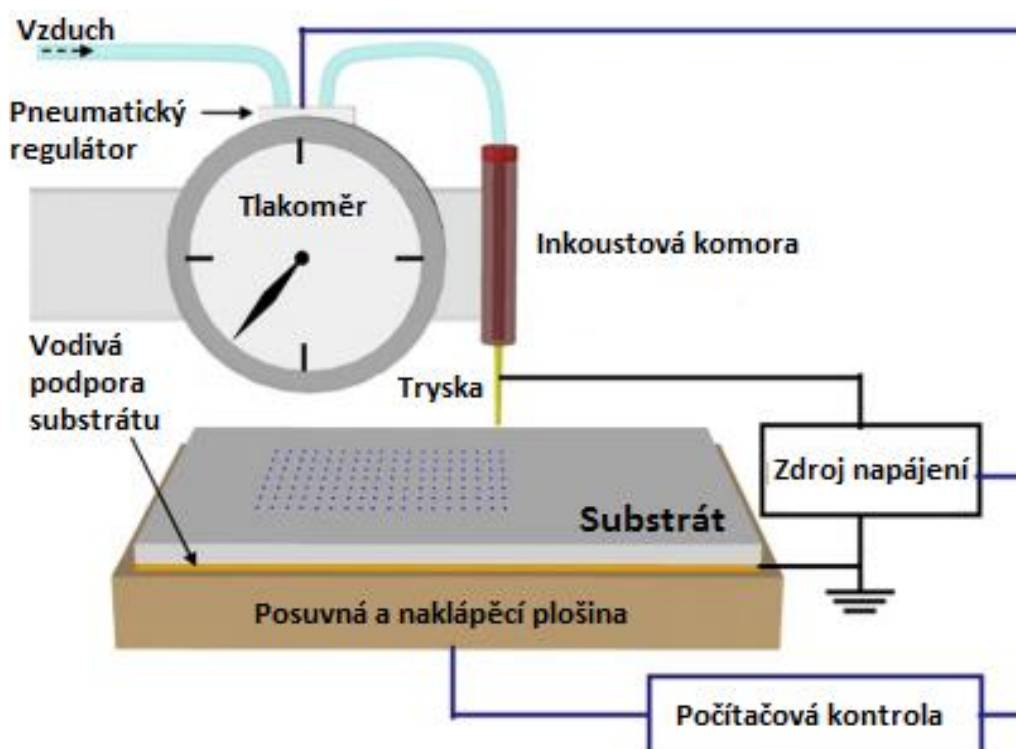
Termální inkjet funguje na principu zahřívání drobných odporů nacházejících se v komoře naplněné inkoustem. Když je na odpory přivedeno napětí, dochází k jejich zahřívání, což způsobuje náhlé exploze páry v inkoustové komoře a dojde k vytvoření vzduchové bubliny. Jak se bublina roztahuje, tak tlačí kapky inkoustu z trysky na substrát a dochází k depozici. Oba typy inkjet využívají akční člen, díky kterému je inkoust vytlačen skrz trysku. Akční člen generuje teplo, což může způsobit poškození tiskové hlavy při dlouhé době tisku, navíc není schopen provozu při vysokých frekvencích. Inkjet není schopen nanášet menší kapičky, než je velikost trysky. Schématické znázornění technologie inkjet lze vidět na *Obr. 1.1*. [2]



Obr. 1.1: Schématické znázornění technologie inkjet (převzato z [3])

## 1.2 E-jet printing

E-jet printing nebo elektrohydrodynamický tisk využívá k depozici materiálu na substrát proudění vybuzené elektrickým polem přes mikrokapilární trysky. Injekční čerpadlo je připojeno ke skleněné kapiláře a dodává tekutý inkoust. Napětí je aplikováno mezi trysku a substrát, tryska musí být potažena kovem a substrát musí být kovový nebo polovodivý. Když je přivedeno dostatečně vysoké napětí, tak dojde k vytvoření elektrického pole, které přivádí ionty na trysku. Jak se ionty v inkoustu hromadí v blízkosti špičky trysky, tak vzájemné Coulombovo odpuzování mezi ionty způsobuje tangenciální napětí na inkoust, čímž se inkoust na hrotu trysky prodlužuje do kuželovitého tvaru, dochází k vytvoření takzvaného Taylorova kužele. Stabilní kuželový paprsek je základním požadavkem pro správnou funkci. Jakmile elektrostatický stres překoná povrchové napětí na špičce kužele, tak dochází k utržení inkoustu a k jeho následné depozici. Typ použitého napětí definuje režim depozice materiálu, při stejnosměrném napětí dochází ke kontinuální depozici nebo DOD depozici, zatímco při střídavém napětí je režim pouze DOD. Šířka nadeponované linie je určena velikostí napětí a vzdáleností trysky od substrátu. Na Obr. 1.2 je vyobrazeno schématické zapojení technologie e-jet.[1][2][4]



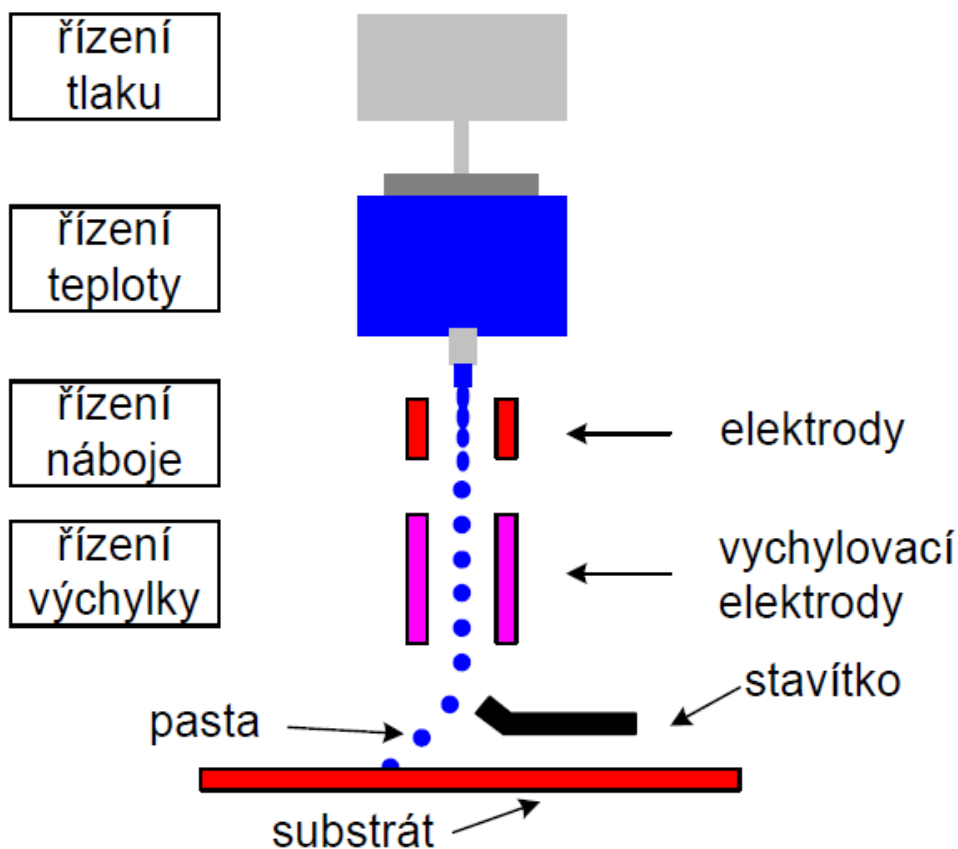
Obr. 1.2: Schématické znázornění technologie e-jet (převzato z [4])

### 1.3 Dispensing

Dispensing, česky dávkování, je další možností depozice materiálu na substrát. Dispensing lze dělit na kontaktní a bezkontaktní. U kontaktního dispensingu je využíváno plných nebo dutých jehel, které jsou ponořeny do kapaliny a následně dojde k dotyku jehly se substrátem, čímž dojde k nanesení kapaliny. Kontaktní dispensing se využívá tam, kde není nutná vysoká rychlost procesu.[5]

Pro zvýšení rychlosti nanášecího procesu byl vyvinut bezkontaktní dispensing, při kterém je výhodou eliminace jehel a také konstantní výška vypouštěcího otvoru nad substrátem, ta se pohybuje v rozmezí 1 až 3,5 mm. K nanášení materiálu dochází vytlačováním kapaliny ze zásobníku, který je možné vyhřívat a tím ovlivňovat viskozitu kapaliny. Množství naneseného materiálu je možné zvýšit počtem dávek na jeden bod. Bezkontaktním dispensingem je možné nanášet až 140 000 bodů za hodinu.[5]

Dokonalejším a zároveň složitějším bezkontaktním dispensingem je takzvaný jetting. Princip spočívá v řízení letu kapky, vypuštěné z dispenseru, elektrickým polem. K tomu slouží dva páry elektrod, první pár elektrod řídí velikost náboje kapaliny, druhý pár řídí výchylku kapaliny, tudíž ovlivňuje její nanesení na požadované místo. Schématické znázornění jettingu je vyobrazeno na *Obr. 1.3*. Tento princip se vyznačuje vyšší rychlostí a přesností depozice a také možností ovrstvovat velmi malé plošky. Jetting se využívá například při nanášení pájky na kontakty flip-chipů.[5]



Obr. 1.3: Schématické znázornění jettingu (převzato z [6])

Nevýhodou dispensingu je jeho rychlost, ta je několikanásobně nižší než u technologie inkjet. To samé platí i pro e-jet, který je limitován jednotryskovým systémem. Velkou výhodou inkjetu je jeho široké rozšíření a tím pádem příznivá pořizovací cena. Inkjet je schopen nanášet inkoust na široké spektrum substrátů, často je komerčně využíván pro tisk na obalové materiály nebo na textil, což je velká výhoda oproti e-jet, kde substrát musí být vodivý. Naopak výhodou e-jet je vysoké rozlišení tisku a také možnost nanášení linií menších, než je průměr trysky. Je to možné díky elektrickému napětí, které je přivedeno na trysku, což u inkjetu není.[2][7]



## 2 Systém Aerosol Jet®

Myšlenka tištěných technologií ve výrobě elektroniky pochází již z počátku 20. století, ale teprve začátkem padesátých let minulého století se začalo s jejich používáním. V té době se začalo s používáním fotolitografie při výrobě desek plošných spojů. Avšak nadále se musely mechanicky vrtat díry a také pájet jednotlivé komponenty. Po fotolitografii se začaly při výrobě elektroniky používat technologie jako inkjet nebo sítotisk. Tyto technologie dnes dobře fungují v průmyslovém měřítku, ale mají svá omezení. Navíc všechny tyto technologie byly vyvinuty pro tisk na papír, mohou být využity jen při výrobě obvodů na rovinném substrátu. Koncem devadesátých let 20. století inicializovala agentura ministerstva obrany pro pokročilé výzkumné projekty (DARPA) projekt na vývoj nového nástroje speciálně určeného pro tisk elektroniky. Projekt byl zaměřen na středně velkou integrovanou konformní elektroniku, jehož cílem bylo vytvořit nástroj schopný rychlé výroby elektroniky přímo z CAD modelů. Tento nástroj musel podporovat široké škály materiálů pro téměř jakýkoliv substrát. Nástroj vyvinutý v rámci tohoto programu je právě Aerosol Jet.[8]

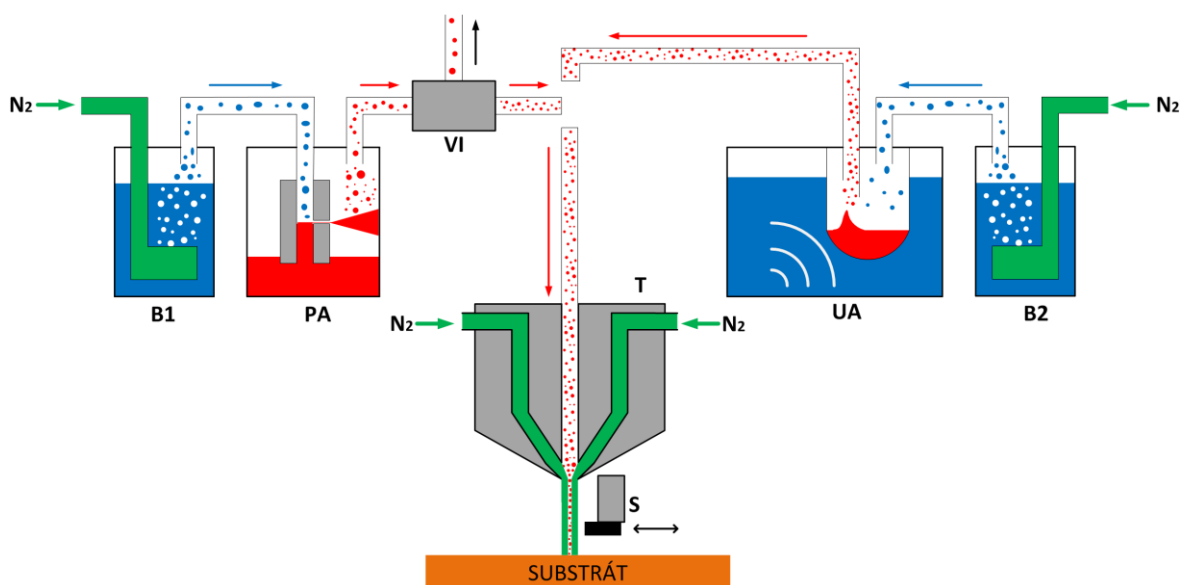
Aerosol Jet, někdy také značeno jako AJP, je moderní technologie určená pro depozici drobných struktur a motivů. Jedná se o aditivní selektivní depoziční techniku, která umožňuje miniaturizaci elektronických systémů a jejich jednotlivých částí. Technologie Aerosol Jet je patentována a vyráběna společností Optomec, která sídlí ve Spojených státech amerických. Technologie Aerosol Jet s sebou přináší několik výhod, které ostatní technologie nemohou nabídnout, patří mezi ně velikost nanášených motivů, možnost tisku na 3D objekty, široká škála použitelných materiálů a mnoho dalších. Teoretická nejmenší šířka natištěné linie může v ideálním případě dosáhnout 10  $\mu\text{m}$ , což je značně menší hodnota, než u jiných technologií.[9][10][11]

Aerosol Jet je revoluční výrobní technologie, která se zcela liší od tradičních výrobních technologií tlustých vrstev jako sítotisk nebo fotolitografie, a zároveň nabízí mnohem větší možnosti než inkjet. Původně byl systém vyvinut, aby vyplnil prázdné místo ve výrobě středně velké mikroelektroniky. Původní výrobní postupy byly schopné vytvářet velmi malé elektronické prvky, například napařování a napařování, nebo naopak poměrně velké například sítotiskem. Žádná technologie nebyla schopna uspokojivě

vytvářet komponenty či zařízení v rozmezí velikostí od 10 do 100  $\mu\text{m}$ . Jak dochází ke stálému zvětšování nároků na velikost elektroniky, tak silnovrstvé technologie již dosahují svých fyzických limitů, na druhé straně tenkovrstvé technologie vyžadují vysoce kvalifikovanou obsluhu a také velké finanční náklady do nové výroby pro každou novou aplikaci. Dalším důvodem, proč technologie byla vyvinuta, byla stále narůstající poptávka po možnosti tisku na 3D substráty a s tím spojená výroba 3D konformní elektroniky.[9][10]

## 2.1 Princip systému

Základním principem systému Aerosol Jet je aerodynamické usměrnění funkčního inkoustu ve formě aerosolu. Aerosol je směs kapalných nebo pevných částic rovnoměrně rozptýlených v plynu, obvykle ve vzduchu. V prvním případě se aerosol označuje jako mlha, v druhém jako dým. U AJP hovoříme o takzvané aerosolové mlze, neboť částice kapalného inkoustu jsou rozprostřeny v plynu. V celém systému je používán dusík, a to jak pro přenos materiálu, tak pro aerodynamické usměrnění aerosolu inkoustu. Celý systém je tvořen několika částmi, které dohromady vytváří unikátní technologii nanášení inkoustu na substrát. Celý systém a jeho jednotlivé části jsou vyobrazeny na *Obr. 2.1*. [9][12]



Obr. 2.1: Schéma systému Aerosol Jet (převzato z [11])

Nejdůležitější částí celého systému je atomizér, jedná se o část, ve které je tvořen z inkoustu aerosol. Atomizéry se v systému nacházejí dva, a to pneumatický a ultrazvukový. Pneumatický atomizér (PA na *Obr. 2.1*) je určen pro inkousty s většími

viskozitami. Viskozita je odolnost tekutiny ke změně tvaru neboli odolnost proti průtoku. Laicky řečeno čím větší je viskozita, tím je tekutina méně tekutá. V pneumatickém atomizéru je možno použít inkousty s viskozitou 1–1000 mPa·s a s velikostí částic do 500 nm, inkoustu je potřeba nejméně 30 ml. Aerosol je tvořen nasáváním inkoustu ze dna nádoby a následným tryskáním na její stěnu, tím dochází k odtrhávání drobných kapiček, které jsou dále unášeny nosným plynem. Druhým typem atomizéru je ultrazvukový atomizér (UA na *Obr. 2.1*), v němž je aerosol vytvořen rozbíjením inkoustu ultrazvukovými vlnami. Nádobka s inkoustem je umístěna do vodní lázně, kterou se šíří vlny směrem k inkoustu. Vlny jsou tvořené piezoelektrickým převodníkem, frekvence se pohybuje v rozmezí 1,6 – 2,4 MHz.[14] Na rozdíl od pneumatického atomizéru je potřeba menšího množství inkoustu, a to konkrétně jen 1 ml, to je velké výhodou oproti pneumatickému atomizéru. Malé množství inkoustu je výhodou hlavně z finančního hlediska, protože v případě tisku drahých kovů nebo jiných unikátních inkoustů je jejich cena velmi vysoká, a tudíž je výhodné, když dochází k jejich co nejmenší spotřebě. Na druhé straně nevýhodou představuje malý rozsah viskozit použitého inkoustu, ta by se měla pohybovat mezi 1 až 5 mPa·s.[9][10][11][14][15]

Před oběma atomizéry se může nacházet bubbler (B1 a B2 na *Obr. 2.1*), jehož účelem je napomáhat při tvorbě aerosolu. Z bubbleru jsou přivedeny kapičky rozpouštědla do inkoustu, čímž dochází k úpravě inkoustu. Náplň bubbleru musí být látka, ve které je daný inkoust rozpuštěn. Často se jedná o vodu, isopropyl alkohol nebo aceton.[10][11]

Další částí systému je virtual impactor (VI na *Obr. 2.1*), úkolem tohoto zařízení je odtahovat přebytečný plyn, a především příliš velké částice inkoustu. Virtual impactor dělá aerosol za ním homogennější.[10][11]

Z virtual impactoru je aerosol unášen nosným plynem do depoziční hlavy s tryskou (T na *Obr. 2.1*). Do tryskové hlavy je kromě nosného plynu s aerosolem přiveden ještě fokusační plyn, jenž prstencově obklopuje přivedený aerosol a tím přímo působí jako usměrňující mechanismus. Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, jedná o takzvané aerodynamické usměrnění. Následně fokusovaný aerosol prochází tryskou a dochází k jeho nanášení na substrát. Hroty trysky jsou ocelové či keramické, mohou být různých tvarů a velikostí. Kruhové keramické trysky s průměrem od 100  $\mu\text{m}$  se využívají pro nanášení jemných motivů, naopak ocelové trysky větších průměrů slouží pro nanášení větších

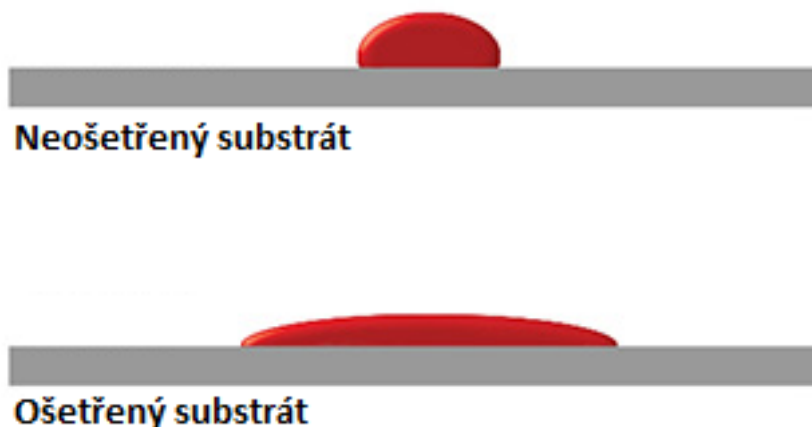
motivů či při pokrývání ploch. Velikost trysky a množství přivedeného fokusačního plynu určují finální šířku nanášené linie. V blízkosti trysky se nachází takzvaný shutter (S na *Obr. 2.1*). Jedná se o mechanické zařízení, které je schopno velmi rychle zastavit depozici aerosolu tím, že se přesune pod špičku trysky. U velkých trysek je přebytečný inkoust ze shutteru odtahován do odpadní nádoby, u malých trysek zůstává inkoust přímo v shutteru.[10][11][14]

Celý proces začíná v programu AutoCAD nebo v jemu podobném, ve kterém je nakreslen požadovaný motiv. Následně je soubor převeden pomocí Optomec VMTools do správného formátu pro Aerosol Jet. Právě díky rychlému návrhu se jedná o takzvanou rapid prototyping technologii, kdy není problém během krátké doby navrhnout a vytisknout více různých obrazců, nebo rychle upravit stávající motiv.[16][17]

## 2.2 Kvalita tisku

Výsledná kvalita natištěného motivu závisí na mnoho faktorech, docílit požadované kvality tisku je náročný proces, neboť se zde nebavíme pouze o tisku samotném, ale i o činnostech před a po tisku. Důležitým faktorem je správný výběr jak inkoustu, tak substrátu a jejich vzájemná kompatibilita. Může se stát, že zakoupený inkoust nemusí být kompatibilní s některými substráty nebo dokonce, že koupený inkoust není vůbec určen pro Aerosol Jet. Některé faktory ovlivňující kvalitu tisku jsou vidět na *Obr. 2.3*. [17]

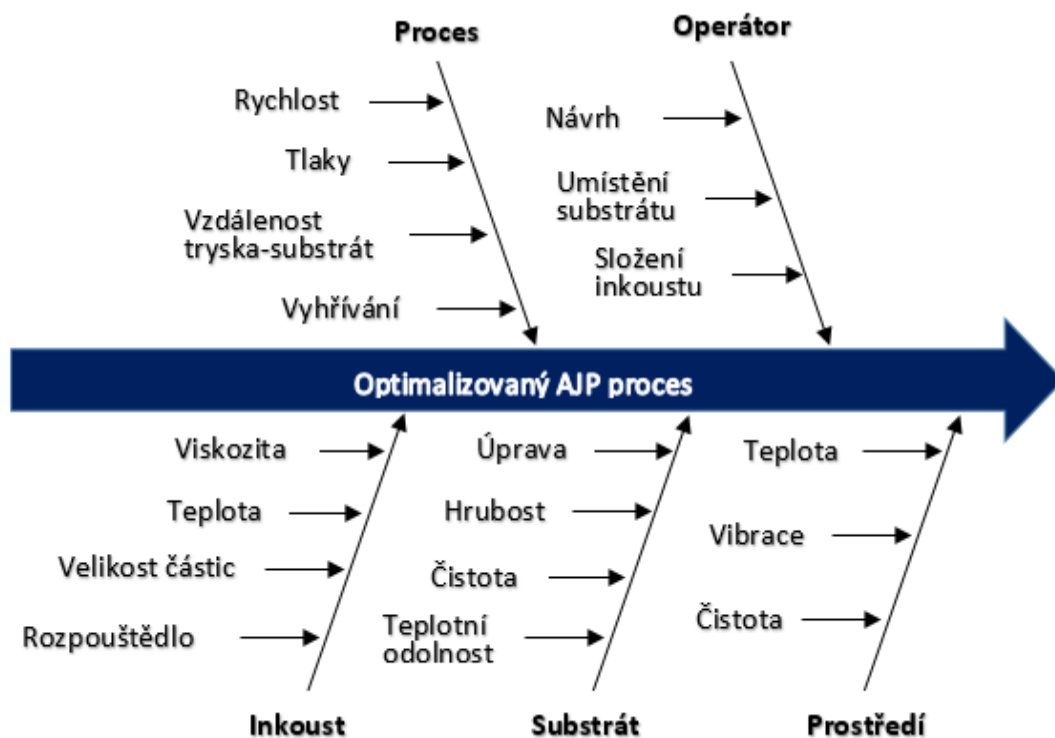
Před samotným tiskem je důležité upravit inkoust, aby měl požadované vlastnosti. Do inkoustu může být přidáno rozpouštědlo, inkoust může být vyhříván na určitou teplotu a zároveň promíchávám. Tímto vším je možné zlepšit atomizaci inkoustu. I substrát může být upraven před tiskem. Opomeneme-li očištění substrátu od viditelných nečistot, tak jednou z nejčastějších úprav je změna povrchové energie substrátu. Substrát může být ošetřen nějakou chemickou látkou, například ethylen-glykolem, nebo ošetřen plazmou, která je součástí Aerosol Jetu. Ošetření substrátu plazmou zvyšuje jeho povrchovou energii, což se projevuje vyšší smáčivostí nebo zvýšení adhezních vlastností, dále čistí substrát i od jemných nečistot. *Obr. 2.2* znázorňuje rozdíl mezi ošetřeným a neošetřeným substrátem. Plazmová úprava povrchu spočívá ve vytvoření aktivních částic (ionty, excitované atomy, radikály), které následně vytvářejí vrstvy nebo vyvolávají chemické reakce.[17][18][19]



Obr. 2.2: Rozdíl mezi ošetřeným a neošetřeným substrátem (převzato z [20])

Během procesu je možné nastavovat průtoky nosného plynu do atomizéru, a v případě pneumatického atomizéru i do virtual impactoru, dále se nastavuje průtok fokusačního plynu v tiskové hlavě. Změnou těchto průtoků jsme schopni měnit velikost nanášeného paprsku. Dále je možné nastavit rychlost pohybu stolku, na kterém se substrát nachází, či jeho vyhřívání. Nastavitelná je i vzdálenost mezi tryskou a substrátem, což umožňuje tisk na nerovinné substráty. Vzdálenost se pohybuje v rozmezí 1–5 mm. Větší vzdálenost mezi tryskou a substrátem je možná díky vysoké rychlosti aerosolu v momentě kdy opouští trysku, tato rychlost dosahuje hodnot až 100 m/s.[14][17]

Ve většině případech musí být nanesené inkousty dále ošetřeny, aby dosáhly svých ideálních vlastností. Inkousty jsou buď sintrovány nebo vytvrzeny podle typu inkoustu, ale i substrátu, na který byl inkoust nanesen. Častými způsoby úpravy jsou například sintrování v peci nebo vytvrzování UV zářením. Vždy je ale nutná dbát na to, aby nedošlo k poškození substrátu. Některé inkousty totiž vyžadují sintrování při teplotách přesahujících 200 °C, až při této teplotě dochází k pevnému spojení nanočástic a inkoust poté dosahuje své nejvyšší vodivosti.[9][17]



Obr. 2.3: Faktory ovlivňující kvalitu tisku (překresleno z [17])

## 2.3 Výhody systému

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, Aerosol Jet s sebou přináší několik výhod oproti starším technologiím. V následujících kapitolách budou tyto výhody podrobněji popsány.

### 2.3.1 Velikost nanášených linií

Jak bylo uvedeno na začátku kapitoly, Aerosol Jet byl původně vyvinut, aby zaplnil mezeru při výrobě linií v rozmezí velikostí 10 až 100  $\mu\text{m}$ . Avšak bylo již dosaženo linií užších než 10  $\mu\text{m}$ , otázkou zůstává, zda této šířky není dosaženo na úkor jiných důležitých vlastností jako například vodivosti. Díky tomuto je možné stále zmenšovat nanášené motivy a tím zmenšovat tištěnou elektroniku.[8][9]

Omezena je i horní hranice šířky nanášených linií, maximální šířky lze dosáhnout pomocí tlusté kovové trysky. Tlustá tryska narozdíl od jemných keramických trysek není kruhového tvaru, její tvar je oválný. Při použití tlusté trysky se tloušťka čáry maximálně pohybuje kolem 500  $\mu\text{m}$ . Z této hodnoty lze vyvodit závěr, že pro nanášení tlustších čar nebo pro pokrývání větších ploch je lepší použít jinou technologii.[8][17]

### 2.3.2 Široká škála materiálů

Nespornou výhodou AJP je možnost použití široké palety funkčních inkoustů a substrátů. Inkousty jsou omezeny jejich viskozitou a velikostí částic. Viskozita inkoustů může být 1 až 1000 mPa·s pro pneumatický atomizér. Pro ultrazvukový atomizér je toto rozmezí sníženo na 1 až 5 mPa·s. Velikost částic by měla být v ideálním případě maximálně 100 nm, avšak horní hranice je až 500 nm. Inkousty pro AJP mohou být na bázi kovových nanočástic (měděné, stříbrné, zlaté), dále rozlišujeme organické inkousty (uhlíkové nanotrubičky, PEDOT:PSS), dielektrické inkousty (polyimid) nebo speciální funkční inkousty (enzymy, magnetické inkousty). Substráty pro Aerosol Jet nejsou omezeny samotnou technologií, ale jen kompatibilitou s nanášeným inkoustem nebo následnou tepelnou úpravou inkoustu. Mohou být použity keramické, kovové, plastové nebo například skleněné substráty. Další výhodou je, že substráty nemusejí být planární, ale mohou být i 3D. Tato vlastnost představuje zcela nové možnosti při výrobě elektroniky.[11][17][21]

### 2.3.3 Tisk na 3D substráty

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2, tisk na nerovinné substráty je možný díky nastavitelné vzdálenosti mezi tryskou a substrátem. Jelikož se jedná o bezkontaktní technologii, tak je možné tisknout přes různé prohlubně a sešikmení. Konkrétní příklad využití může být nahrazení bondovacích drátků. Oba konce bondovacích drátků se často nacházejí v různé výšce, tudíž substrát není rovinný. Výhodou využití AJP je zlepšení mechanické spolehlivosti zařízení, nehrozí odtrhnutí drátků díky vibracím a otřesům.[9]

Pro tisk na 3D povrchy vyvinul Optomec tří a pětiosý systém. Díky těmto systémům je možné tisknout na zaoblené nebo vertikální povrchy. Tisk na 3D povrchy nachází využití při tvorbě propojení polovodičových čipů, senzorů a antén pro mobilní zařízení (k vidění na Obr. 2.4). Anténa vytvořená pomocí AJP má srovnatelné vlastnosti s běžnými anténami, navíc není nutné pokovování, není použit nikl ani chemikálie.[8][9]



Obr. 2.4: Natištěná 3D anténa pomocí AJP (převzato z [8])

### 2.3.4 Jednoduchost a rychlost návrhu

Pro nanášení vrstev pomocí AJP je nutné mít jen samotnou technologii a počítač s CAD systémem. Není nutné mít další pomůcky jako síta, šablony či rámy. Díky své jednoduchosti při tvorbě motivu a následného prototypu se technologie označuje jako rapid prototyping (rychlý návrh prototypů). Zrychlení procesu tvorby prototypů dovoluje větší flexibilitu v hromadné výrobě. Aktivní a pasivní komponenty ale i propojení mohou být vytištěné pomocí AJP, což umožňuje integrovanou výrobu elektronických systémů.[8][9][14]

### 2.3.5 Nízké výrobní náklady

Nízkých výrobních nákladů je dosaženo díky jednoduchosti a eliminaci dalších nástrojů a pomůcek, které jsou nezbytné například u sítotisku. Technologie rapid prototyping se nejvíce vyplatí při tvorbě prototypů nebo při výrobě malého počtu kusů. Naopak při sériové výrobě se vyplatí více tradiční výrobní technologie. V ideálním případě jsou použity obě technologie dohromady, čímž se dosáhne největšího snížení výrobních nákladů. Nutno podotknout, že náklady na pořízení technologie Aerosol Jet jsou značně vysoké, což může odradit, i přes všechny výhody, potencionální zájemce o koupi. Je to způsobeno tím, že se jedná o unikátní patentovanou technologii, která se dostala na trh poměrně nedávno.[9]

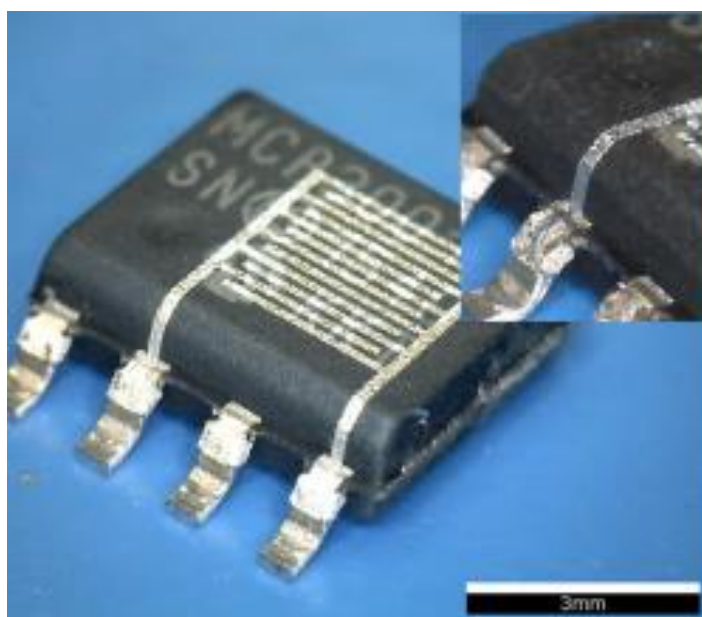
## 2.4 Současné využití systému Aerosol Jet

V této kapitole budou popsány některé příklady využití AJP z odborných článků z časového rozpětí 2017 až do současnosti. Současné využití AJP je převážně ve vědě a výzkumu, a to v těch aplikacích, které vyžadují některou z unikátních vlastností, kterou



tato technologie přináší. Jedná se převážně o velikost nanášených linií a možnost tisku na 3D nebo flexibilní substráty.

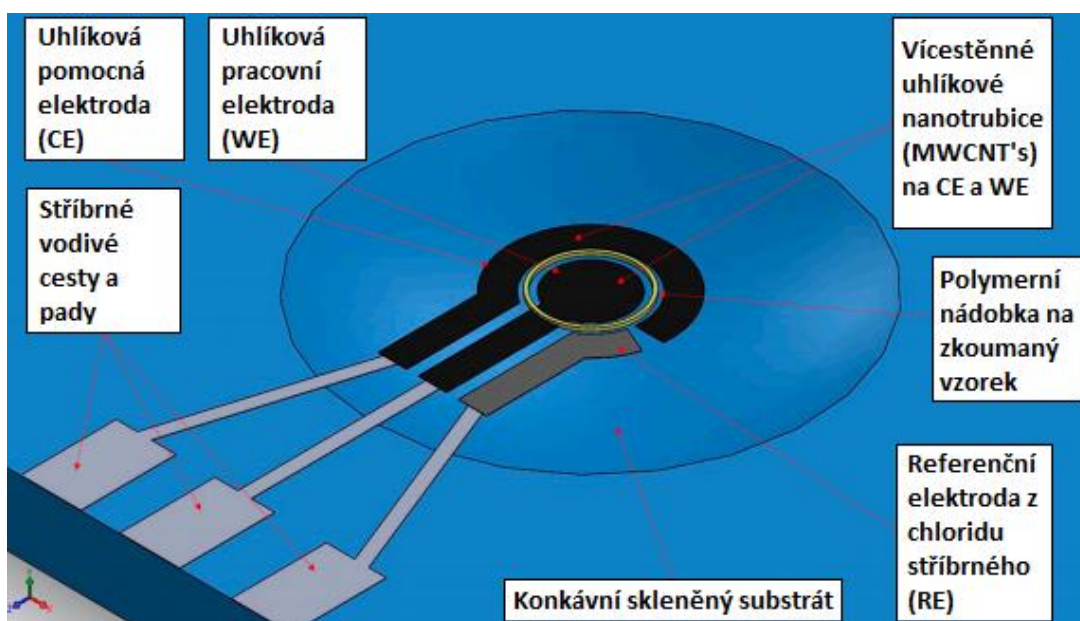
Prvním příkladem využití technologie AJP je tisk senzorů na pouzdra integrovaných obvodů. Díky integraci tištěných senzorů přímo na integrovaný obvod lze vyvinout nové druhy zákaznických integrovaných obvodů (ASIC), které mohou být menší a lehčí než v porovnání se samostatným senzorem. Konkrétní příklad je tisk vlhkostního senzoru na analogově digitální převodník, natištěný sensor na pouzdře převodníku ukazuje *Obr. 2.5*. Pomocí AJP byla natištěna interdigitální elektroda a propojení, snímací vrstva byla nanášena pomocí pipety. Bylo využito schopnosti tisknout na 3D substrát, neboť sensor se nachází i na boční straně pouzdra. Vlhkostní sensor vykazuje silnou odezvu na změnu relativní vlhkosti vzduchu, nízkou hysterezi a dobré charakteristiky opakovatelnosti.[13]



*Obr. 2.5: Natištěný vlhkostní sensor na pouzdře převodníku (převzato z [13])*

Dalším využitím AJP může být tvorba senzorů, kde kromě elektrod a propojení, jsou i jiné části senzoru natištěny pomocí AJP. Právě možnost nanášení různých materiálů se využívá při tvorbě senzorů, kde jsou často využívány uhlíkové nanotrubičky jako senzitivní vrstva. První ukázkou takového typu senzoru je sensor pH na flexibilním substrátu, kde uhlíkové nanotrubičky byly nanášeny mezi dvě stříbrné elektrody, obojí bylo vytvořeno pomocí AJP. Sensor vykazuje kladnou závislost odporu na hodnotě pH, vysokou citlivost a dobrý čas odezvy. Navíc bylo zjištěno, že sensor je biokompatibilní, a tudíž vhodný pro lidské tělo. Dalším typem senzoru je 3D elektrochemický sensor pro detekci bílkovin.

Senzor byl natištěn na konkávní skleněný substrát a byl zcela vytvořen pomocí AJP. Při tvorbě senzoru bylo použito několik různých inkoustů, a to vodivý stříbrný inkoust, uhlíkový inkoust, inkoust s chloridem stříbrným, inkoust s uhlíkovými nanotrubicemi a UV vytvrditelný polymerní inkoust. Senzor se skládá ze tří elektrod, na prostřední pracovní elektrodě se nachází 3D polymerní nádobka na zkoumaný vzorek. Schématické znázornění senzoru ukazuje *Obr. 2.6*. Výsledný senzor vykazuje nižší mez detekce oproti sítotisku, dále vykazuje dobrou opakovatelnost výroby a také značně menší spotřebu materiálu.[22][23]



*Obr. 2.6: Schématické znázornění elektrochemického senzoru (převzato z [23])*

### 3 Teplotní senzory na vláknech

Vlákna nebo obecně textilie poskytují ideální strukturu pro vložení senzorů, které mohou být využity v řadě aplikací. Teplotní senzory na vláknech se často používají ve zdravotnictví při léčení nemocí nebo při hodnocení zdravotního rizika, dále při monitorování fyzické aktivity u vrcholových sportovců nebo při hodnocení stresu na pracovišti. Jako konkrétní příklad využití senzorů na vláknech můžeme uvést snímání teploty kůže u pacientů trpící cukrovkou, kterou doprovází tvorba diabetických vředů. Textilie představují vhodný substrát pro senzory, neboť jsou přizpůsobivé a prodyšné, což umožňuje jejich pohodlné používání, aniž by pacient o jejich přítomnosti věděl.[24][25][26]

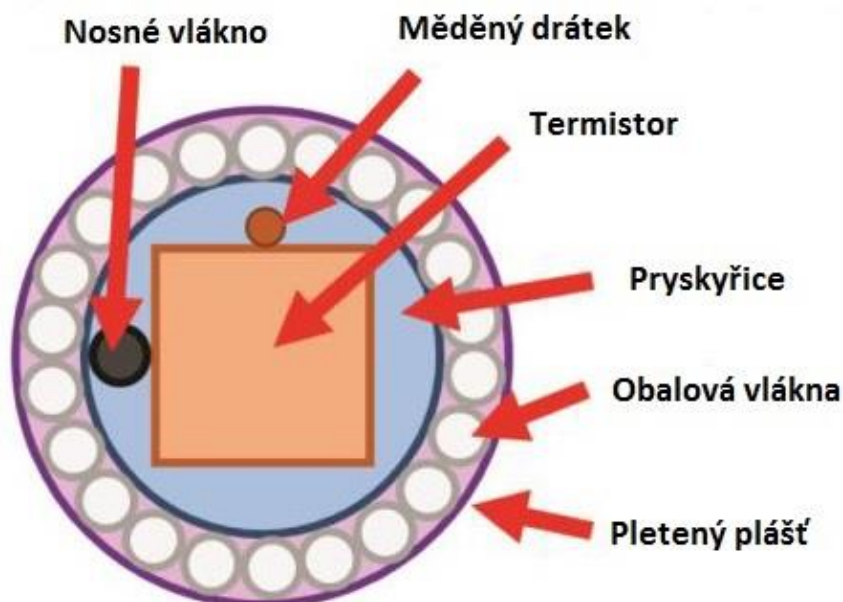
V současnosti se teplotní senzory na vláknech dají rozdělit do několika skupin. První skupinou jsou běžně používaná teplotní čidla, která jsou implementována přímo do vlákna. Základem druhé typu je klasický odporový teploměr. Do textilie je buď vetkaný kovový drátek nebo je do textilie implementován flexibilní substrát s nadeponovanou vodivou vrstvou. Dalším v současnosti využívaným typem je teplotní senzor na bázi uhlíkových nanotrubic. Vše uvedené druhy teplotních senzorů na vláknech budou detailněji popsány v následujících kapitolách.[24][26][27][28]

#### 3.1 Konvenční termistory na vláknech

Základem tohoto typu senzorů na vláknech je běžný SMD termistor, jenž je připájen na měděný nebo jiný vodivý drátek, který je vetkán do textilie. Dále je nutná přítomnost nosného vlákna, které slouží jako mechanická opora měděného drátku. Termistor, nosné vlákno a propojení je nakonec zapouzdřeno, aby nedocházelo ke znečištění a tím pádem poruchám zařízení.[24][25]

Vědecký článek Nottingham Trent univerzity detailněji popisuje vytvoření prototypu teploty snímající ponožky. Cílem bylo použití prototypu pro detekování teploty chodidla pacientů s cukrovkou v pokročilé fázi, jenž je doprovázená tvořením diabetického vředu. Jako teplotu snímající element byl použit měděný drátek, jehož vnější průměr je 140  $\mu\text{m}$ , na drátek byl následně připájen NTC termistor rozměrů 0,5mm x 0,5mm x 1 mm, jenž je citlivý na požadovaný teplotní rozsah. V tomto případě se jedná o teploty v rozmezí 25 až

38 °C. Jako nosné vlákno byla použita termoplastická monofilová příze spředená z polymeru z tekutých krystalů. K zapouzdření byly použity tři vrstvy, nejdříve ultrafialovým záření vytvrditelná pryskyřice, která válcově obklopuje všechny komponenty, následují obalová vlákna a pletený plášť. Celý obal chrání zařízení před mechanickým a chemickým namáháním, které by mohlo ovlivnit měření. Schéma navrženého teplotního snímače je vidět na *Obr. 3.1.*[24]



*Obr. 3.1: Schéma navrženého teplotního snímače (převzato z [24])*

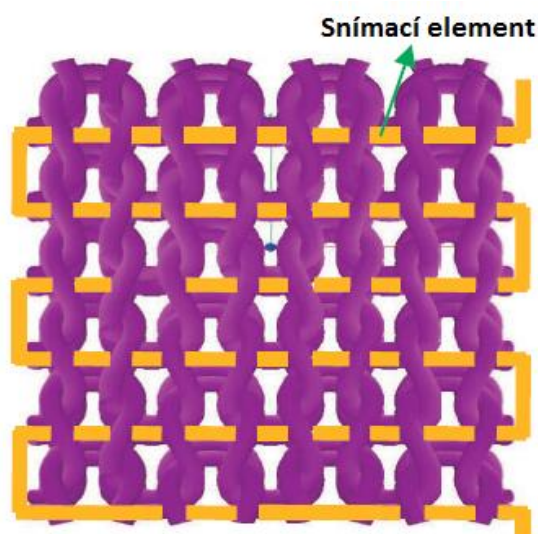
Senzor vykazuje přesnost  $\pm 0,5$  °C pro 63 % měřených případů. Taková přesnost nemusí být dostačující pro měření teploty u pacientů s diabetickými vředy. Nutno podotknout, že se jednalo o první prototyp, takže je zde prostor pro zlepšení funkce a to například použitím jiného termistoru.[24]

### 3.2 Teplotu snímající textilní struktury

V tkaninách snímajících teplotu (TSF) se v současnosti používají tři teplotu snímající technologie, jedná se o odporový teploměr (RTD), termistor nebo termočlánek. Termistor je křehké polovodičové zařízení, obvykle zapouzdřené ve skle, jehož odpor se mění v závislosti na teplotě. Termočlánek jsou vyrobeny ze dvou různých vodivých drátků, které jsou dohromady svařeny, vyžadují poměrně složitou elektroniku. Termočlánek ani termistory nejsou tak přesné jako odporové teploměry. Ty měří teplotu tím, že korelují

odpor jemně stočeného drátku (obaleného kolem izolátoru), který se mění s teplotou. Stočený drátek je ochráněn od vnějšího prostředí umístěním do ochranného obalu.[27]

Tkanina snímající teplotu je vytvořena integrací kovového drátku, který slouží jako snímací element, do tkaniny. Musí být vybrán vhodný materiál snímacího elementu a základní tkaniny, dále je důležité vybrat vhodný textilní proces k výrobě. Drátek se dá do textilní struktury vložit několika způsoby a to pletením, tkaním nebo vyšíváním. Nicméně u většiny senzorů je nutný blízký kontakt s tělem, což je důvod, proč jsou nejčastěji používané pletené struktury, které se snadno přizpůsobují tvaru těla a také jsou prodyšné. Další jejich výhodou je jednoduchá příprava a zpracovatelnost široké škály vodivých přízí. Obr. 3.2 znázorňuje vložený snímací element do pletené struktury.[27]



Obr. 3.2: Pletená struktura s vloženým snímacím elementem (převzato z [27])

Nejběžnějším materiálem používaným jako snímací element je platina. Jedná se o velmi jemný a relativně krátký platinový drátek, jehož průměr je menší než 25  $\mu\text{m}$ . Velkou výhodou platiny je právě její malé množství. Je to dáno tím, že platina má ve srovnání s jinými kovy nejvyšší měrný odpor (rezistivitu), tudíž pro dosažení jmenovitého odporu je jí potřeba jen omezené množství. Další výhodou platiny je její vysoká citlivost, relativně krátká doba odezvy nebo její dostupnost v nejčistší formě a stabilita při vysokém rozsahu teplot. Nutno říci, že cena platiny je značně vyšší než jiných materiálů. Přehled vlastností platiny a dalších materiálů vhodných pro snímací element je k vidění v Tab. 3.1.[27]

Tab. 3.1: Přehled vlastností vybraných materiálů snímacího elementu (převzato z [27])

Vlastnost	Jednotka	Měď	Wolfram	Nikl	Platina
Rezistivita	[ $\Omega \cdot m$ ]	1,67e-08	5,6e-08	7,5e-08	10,6e-08
Tepelná kapacita	[J/K]	0,39	0,13	0,54	0,13
Tepelná vodivost	[W/m·K]	386	180	86	72
Citlivost	[m $\Omega$ /°C]	9	32	60	53
Pevnost v tahu	[MPa]	260	2500	500	130
Cena	[\$/oz]	0,26	1,6	0,64	1835

Implementace kovového drátku do tkaniny není jediný způsob, jak vytvořit teplotu snímající textilii. Další možností je použití flexibilního substrátu, na který je nejdříve nanesen vodivý materiál a následně je substrát rozřezán na tenké proužky, které jsou poté vtkány do textilie. Hlavními překážkami při použití tohoto způsobu je navržení senzoru, který musí být dostatečně malý, aby se vešel na úzký proužek substrátu, a použití vhodných materiálů a spojovacích vrstev, které odolají vysokému namáhání při řezání a tkaní.[26]

Tomuto způsobu vytvoření TSF se věnuje vědecký článek Švýcarského federálního technologického institutu, v němž je detailně popsán celý proces výroby. Jako materiál pro vytvoření odporového senzoru teploty byla použita platina, a to díky vhodným vlastnostem, které byly popsány v Tab. 3.1. Jako substrát byl vybrán Kapton E, jenž disponuje vysokou rozměrovou stabilitou a malým koeficientem tepelné roztažnosti. Na Kaptonovou folii bylo nanášeno fotolitografií několik senzorů meandrovitého tvaru, folie byla následně rozřezána na 500  $\mu m$  široké proužky. Každý proužek byl následně vetkán do tkaniny, stejně jako vodivý drátek v předchozí případě. Výsledné vlastnosti senzoru před tkaním byly dobré, závislost odporu na teplotě byla lineární a odpor senzoru byl v průměru 665  $\Omega$ . Avšak při procesu vtkaní do textilie došlo k popraskání platiny, to mělo za důsledek přerušování vodivé cesty, tudíž senzor byl nefunkční.[26]

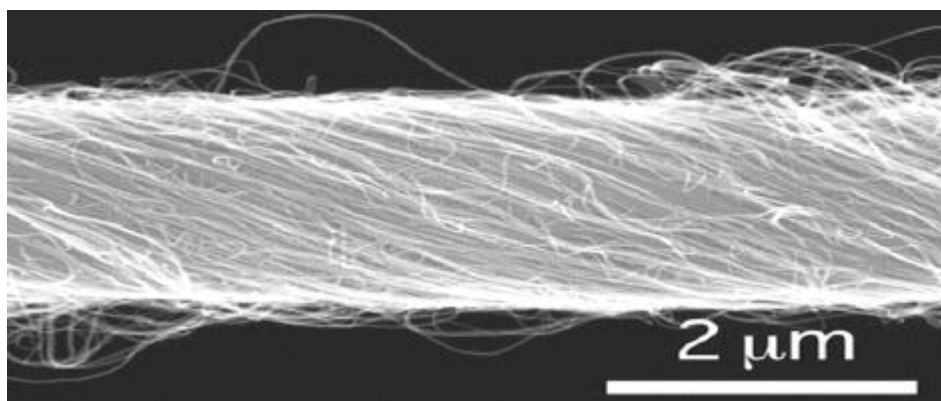
### 3.3 Senzory na bázi uhlíkových nanotrubic

Novým materiálem, který se dá využít jako senzor teploty, jsou uhlíkové nanotrubičky (CNT). Jedná se o válcové útvary, jejichž stěny jsou tvořeny atomy uhlíku, respektive jeho supertenkou formou – grafenem. Podle počtu vrstev se dělí na jednovrstvé (SWCNT) nebo vícevrstvé (MWCNT). Některé vlastnosti uhlíkových nanotrubic jsou výjimečné, a to

především jejich pevnost a tepelná vodivost, pro použití v elektrotechnice je klíčovou vlastností nezávislost odporu na délce. Nejběžnější metodou pro výrobu CNT je chemická depozice z plynné fáze (CVD). CVD je chemický proces pro výrobu tenkých filmů jako například právě uhlíkových nanotrubic. Proces potřebuje vysokou energii (600 – 900 °C) pro rozštěpení plynných zdrojů uhlíku jako je metan či oxid uhelnatý. Reaktivní atomy uhlíku difundují k substrátu pokrytému katalyzátorem a kondenzují za vzniku uhlíkových nanotrubic.[29][30]

### 3.3.1 Senzory s čistými CNT

Senzorů na bázi uhlíkových nanotrubic je více typů, první z nich je založen na vytvoření příze uhlíkových nanotrubic tažením MWCNT ze substrátu, na kterém byly vytvořeny pomocí CVD. Výsledné vlákno se skládá z náhodně provázaných MWCNT o průměru přibližně 10 nm, které jsou současně vytahovány ze substrátu a krouceny typicky 20000 otáčkami/min. Průměr výsledného vlákna se pohybuje v rozmezí od 2 do 10  $\mu\text{m}$ , elektrická vodivost je 300 S/cm a teplotní součinitel elektrického odporu je  $-0,1 \Omega/^{\circ}\text{C}$ . Vytvořené vlákno skládající se z jednotlivých MWCNT je vidět na *Obr. 3.3*.[28][29]



*Obr. 3.3: Vytvořené vlákno z uhlíkových nanotrubic (převzato z [28])*

Nejběžnější použití takových vláken je měření mechanického napětí, tedy v tenzometrech, teplotní závislost je spíše sekundární efekt. Avšak možnost měřit současně mechanické napětí a teplotu představuje velkou výhodu oproti klasickým zařízením.[28]

### 3.3.2 Senzory s kompozitem

Druhý typ senzoru nevyužívá čisté uhlíkové nanotrubice, ale kompozitní materiál, kde se jako nosná matrice používá polymer, do kterého je přidáno jen určité množství

MWCNT (většinou do 2 %). Výsledný kompozitní materiál je teplotně citlivý a je možné nanést přímo na jádro vlákna, a to natištěním nebo ponořením.[7]

Tomuto tématu se věnovali polští vědci, kteří ve svém článku popsali výběr jednotlivých materiálů, postup výroby a výsledné vlastnosti senzoru. Jako substrát bylo vybráno monofilní vlákno PVDF (polyvinylidenfluorid), které disponuje vysokou flexibilitou a nižším teplotním faktorem s dostatečnou tepelnou odolností. Další výhody tohoto vlákna jsou nízké náklady, kompatibilita s technologií tkaní a také jeho dielektrický a koroziivzdorný charakter. Jako nosná matrice byla použita polymerní pryskyřice, v tomto případě 12% roztok butylacetátu. Samotné uhlíkové nanotrubičky byly přidány do PMMA (polymethylmethakrylát) rozpuštěném v organickém rozpouštědle. Aby výsledný kompozitní materiál byl co nejvíce homogenní a nedocházelo ke vzniku aglomerátů CNT, musel být hodinu v ultrazvukové lázni, tím se docílilo spojení všech složek kompozitního materiálu. Výsledný teplotní senzor vykazuje lineární závislost v rozsahu teplot od 32 °C až 42 °C a jeho teplotní koeficient (TCR) je 0,13 %.[7]

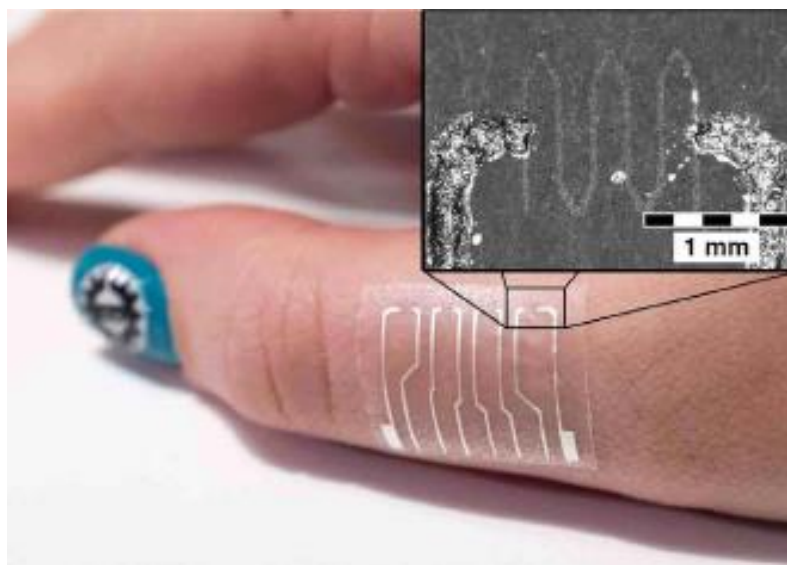
### 3.4 Senzory na bázi grafenu

Jak bylo řečeno v kapitole 3.3, grafen tvoří základ uhlíkových nanotrubic, a tudíž disponuje stejnými unikátními vlastnostmi. V současné době se grafenové teplotní senzory vytvářejí převážně na flexibilních a pružných substrátech, avšak jejich přenos na vlákno je otázkou dostatečného zmenšení, které umožňují některé nové technologie.[31][32]

Jako konkrétní případ můžeme uvést teplotní senzor vytvořený pomocí fotolitografie. Na elektrody byly použity stříbrná nanovlákna a na teplotu snímající kanál byl použit grafen s nanocelulózovým pojivem. Elektrody a detekční kanál byl zcela zapuštěn do matrice z PDMS (polydimethylsiloxan), aby bylo dosaženo vysoké roztažnosti při zachování snímacích vlastností. Výsledky měření ukazují typický záporný teplotní koeficient v rozsahu teplot od 30 °C do 100 °C. Zajímavé je, že i po natažení o 50 % vykazuje senzor dobré snímací vlastnosti a také rychlou dobu zotavení po vrácení se do původního stavu. To naznačuje, že senzor má dobré předpoklady pro budoucí použití v nositelné elektronice.[31]



Dalším příkladem senzoru na bázi grafenu je tištěný senzor pomocí technologie inkjet a sítotisku. Stejně jako technologie aerosol jet představuje inkjet aditivní selektivní technologii, tudíž i použité materiály mohou být podobné. Finský vědecký článek popisuje vytvoření teplotního senzoru na flexibilním, pro pokožku vhodném, substrátu. Jako substrát byl použit polyuretan (adhezivní bandáž), který je vhodný pro použití na lidském těle. Vodivá část senzoru byla natištěna stříbrným inkoustem pomocí sítotisku, tloušťka nanesené linie byla 340  $\mu\text{m}$ . Snímací část senzoru byla vytvořena pomocí inkoustu obsahující grafen a PEDOT:PSS, tloušťka linie byla 32  $\mu\text{m}$ . Teplotní senzor vykazoval záporný teplotní koeficient o hodnotě vyšší než 0,06 % na stupeň Celsia při teplotách od 35  $^{\circ}\text{C}$  do 45  $^{\circ}\text{C}$ . Natištěný senzor s detailem snímací části z grafenu/PEDOT:PSS lze vidět na Obr. 3.4.[32]



Obr. 3.4: Natištěný senzor s detailem na snímací část (převzato z [32])

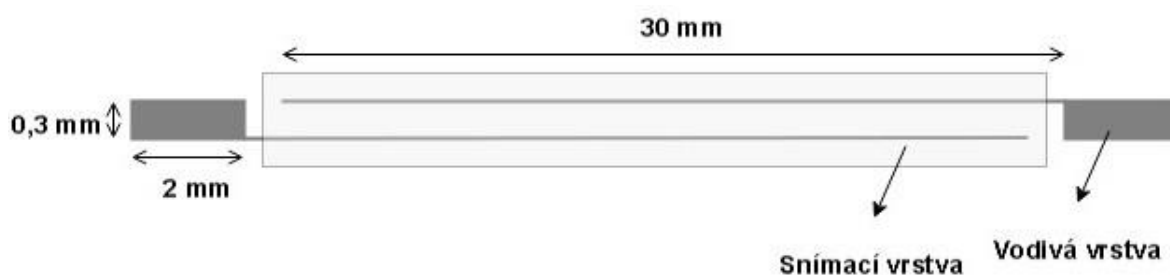
## 4 Experimentální část

Předchozí kapitoly pojednávali o teplotních senzorech na vláknech, které postupně nacházejí uplatnění ve více odvětvích. Používají se především tam, kde je nutnost přesného měření teploty a zároveň jsou kladeny vysoké nároky na velikost senzoru a možnost implementace do většího celku, například do textilie. Teplotních sensorů na vláknech existuje několik druhů, avšak některé z nich jsou složitější na výrobu, jiné není možno tak snadno implementovat do textilie. Řešením by mohly být tištěné teplotní senzory na vláknech, jejichž výroba je jednoduchá a rychlá, jsou snadno implementovatelné do textilií, neboť dosahují malých velikostí a mohou být na flexibilních substrátech.

Experimentální část práce se zaměřuje na vytvoření prototypu tištěného teplotního senzoru na vláknech pomocí technologie Aerosol Jet. Tato technologie umožňuje vytvoření různých prototypů teplotního senzoru na vláknech použitím odlišných materiálů a substrátů, právě vytvoření teplotního senzoru na vláknech a následné otestování jeho funkčnosti je hlavním cílem diplomové práce. V následujících kapitolách bude popsán celý proces výroby teplotního senzoru od návrhu přes popsání použitých materiálů až po samotnou výrobu senzoru.

### 4.1 Návrh senzoru

Při návrhu teplotního senzoru na vláknech bylo nutné zohlednit hlavní požadavky na senzor, a to především velikost senzoru a jeho odezvu na změnu teploty. Z těchto důvodů byl navržen motiv se dvěma kolineárními elektrodami (viz *Obr. 4.1.*), jedná se o velmi jednoduchý motiv, který ale splňuje všechny požadavky na senzor. Motiv se skládá ze dvou samostatných vrstev, jedná se o vodivou a snímací vrstvu.



Obr. 4.1: Navržený motiv senzoru

Vodivá vrstva je tvořena dvojicí rovnoběžných vodivých čar zakončenými vodivými ploškami pro kontaktování a byla vytvořena vodivým inkoustem. Snímací nebo aktivní vrstva kompletně překrývá vodivé linie v prostoru mezi vodivými ploškami a reaguje na změnu teploty. Aktivní vrstva je tvořena natištěným materiálem na bázi grafenu, který ovlivňuje odpor vodivé vrstvy při změnách teploty. Motiv byl navrhnout v programu AutoCAD a následně pomocí doplňku VMTools převeden do požadovaného formátu pro Aerosol Jet. V doplňku VMTools je možné nastavit, jakým stylem a kolika liniemi budou vyplněny vodivé plošky. Při vyplňování ploch je důležité, aby se v prostoru nenacházely místa bez výplně a zároveň, aby vrstva byla co nejhomogennější. Základní navržený motiv má šířku 300  $\mu\text{m}$ , která je dostatečně malá na to, aby mohl být senzor natištěn na vlákno. Je počítáno s tím, že šířka základního motivu není konečná, je zde prostor pro další zmenšení. Změna motivu je velmi jednoduchá právě díky využívání programu AutoCAD.

## 4.2 Použité materiály

Tato kapitola se zabývá použitými materiály, budou v ní popsány použité substráty a materiály pro nanesení vodivé a snímací vrstvy. Použití vhodných materiálů je klíčové pro vlastnosti senzoru. Kromě samotného použití vhodných materiálů je důležitá i jejich vzájemná kompatibilita.

### 4.2.1 Substrát

Substrát pro senzor na vláknech by měl být flexibilní a dostatečně kompaktní, aby byla možná jeho následná integrace do textilií. Pro vytvoření teplotního senzoru na vláknech byly vybrány dva substráty. Oba substráty byly ve formě folie velikosti A4, která může být následně nastříhaná na požadovanou velikost.

- DuPont™ Kapton® HN – transparentní oranžová polyimidová folie velikosti A4 od společnosti DuPont™ s vynikajícími vlastnostmi při širokém rozsahu teplot (- 269 °C až 400 °C), může být děrována, pokovována nebo adhezivně přizpůsobována.[33][34]
- Melinex® 339 – neprůhledná bílá polyesterová folie velikosti A4 od společnosti DuPont Teijin Films™, s oboustranně upravenou adhezí a

vynikajícími manipulačními a tiskovými vlastnostmi. Tepelně stabilní do teploty 150 °C.[34][35]

#### 4.2.2 Vodivá vrstva

Pro nanesení vodivé vrstvy byly použity dva stříbrné nanočásticové inkousty, které disponují různými vlastnostmi. Inkousty se liší například rozpouštědlem nebo teplotou vytvrzení.

První použitý inkoust byl PRELECT<sup>®</sup> TPS 50G2, jedná se o nanostříbrný vodivý inkoust od společnosti Clariant. Inkoust byl vytvořen speciálně pro technologii Aerosol Jet, dosahuje dobré vodivosti při nanesení tenké vrstvy. Viskozita inkoustu je  $50 \pm 20$  mPa·s, obsah pevných částic  $50 \pm 2$  wt%, rezistivita 0,03 Ω/sq. Nevýhodou je vysoká teplota vytvrzení inkoustu, ta by podle výrobce měla být 200 °C po dobu alespoň 30 minut. Velkou výhodou inkoustu je jeho rozpustnost ve vodě, přidáním vody se dá jednoduše ovlivňovat jeho viskozita a také je inkoust lehce smývatelný z jednotlivých částí zařízení Aerosol Jet.[36]

Druhý použitý inkoust má označení xcm-nsUA1, je to nanostříbrný vodivý inkoust od společnosti Xerox<sup>®</sup>. Zkratka UA značí, že inkoust je vhodný pro ultrazvukový atomizér. Jeho viskozita je 3–5 mPa·s, obsah pevných částic 50–55 wt%, vodivost větší jak  $9 \cdot 10^4$  S/cm. Na rozdíl od prvního inkoustu nepotřebuje inkoust od Xeroxu tak vysoké teploty pro jeho vytvrzení, pro vytvrzení inkoustu stačí teploty v rozmezí 80 až 130 °C. Nevýhodou je jeho rozpouštědlo, které musí být ze skupiny uhlovodíků. Jedná se například o rozpouštědla jako toluen nebo xylen, ty jsou zdraví škodlivé, a navíc zatěžují životní prostředí. Na oficiálních stránkách výrobce je uvedena cena inkoustu, ta je 750 dolarů za 50 gramů.[37]

#### 4.2.3 Aktivní vrstva

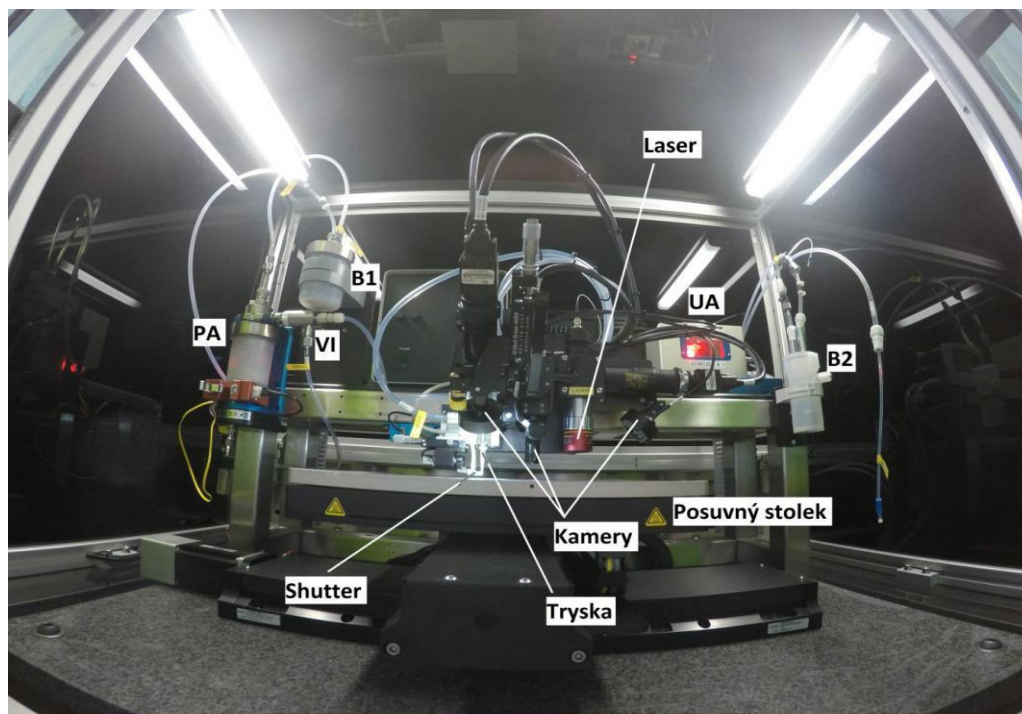
K vytvoření aktivní vrstvy byl použit inkoust na bázi grafenu. Inkoust je tvořen redukováným oxidem grafenu (rGO) smíchaným s rozpouštědlem DMAC (d-methylacetamid) v poměru 1 mg: 1 ml. Výsledná sloučenina byla poté sonifikována v ultrazvukové čističce po dobu 6 hodin. Kvůli energii ultrazvuku docházelo k zahřívání vody uvnitř čističky, proto bylo nezbytné zajistit cirkulaci vody, aby docházelo

k průběžnému chlazení a systém mohl být v provozu nepřetržitě celých 6 hodin. Po vyjmutí disperze z ultrazvuku následoval proces centrifugace, při kterém dochází k odstředění zbytku pevných částic. Rychlost otáčení byla 10 000 rpm po dobu 1 hodiny. Stabilita výsledné disperze se pohybuje v řádu několika dní až týdnů.

Výroba oxidu grafenu je složitý proces, který začíná výrobou grafit oxidací přírodních grafitových vloček, jedná se o Hummersovo metodu. Oxid grafenu je získáván odlupováním grafit oxidu z ultrazvukové lázně a následné centrifugace. Oxid grafenu je následně metodou kapkového lití nanosen na platinové interdigitální elektrody a redukován na rGO nízkoteplotním žiháním (400 °C) a úpravou parou hydrazinu. Při těchto úpravách dochází k odstranění funkčních skupin kyslíku, což snižuje vzdálenost mezi atomy uhlíku a usnadňuje přenos náboje. Mezi výhody teplotního snímače na bázi rGO patří jeho vysoká citlivost, stabilita, opakovatelnost a vysoký rozsah teplot.[38][39]

### 4.3 Výroba senzoru

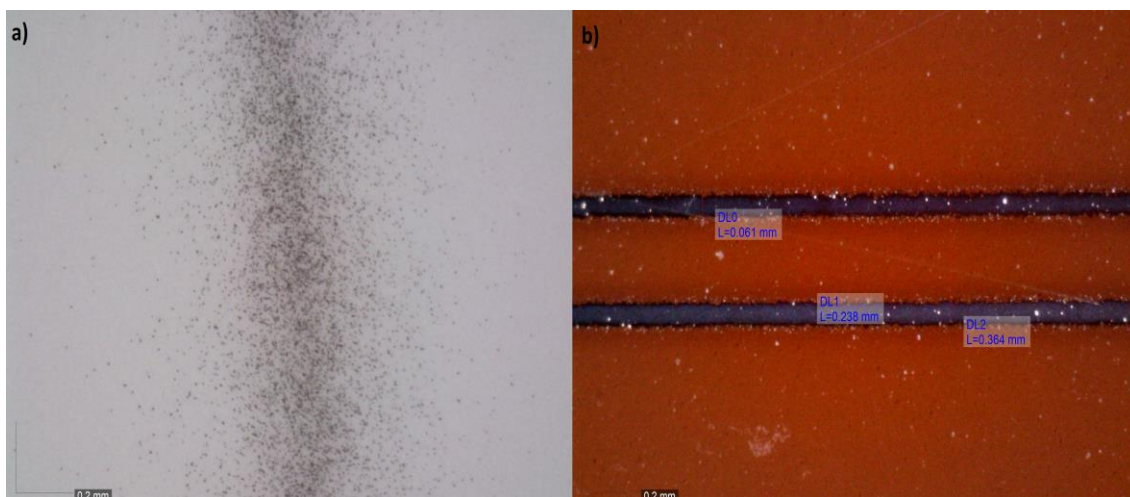
K vytvoření senzoru bylo použito zařízení Aerosol Jet, nacházející se v Regionálním centru pro elektrotechniku. Jedná se o základní tříosý model Aerosol Jet AJ300, který obsahuje posuvný vyhřívaný vakuový stolek o velikosti 300 mm x 300 mm, ten umožňuje přichycení substrátu a částečné vysušení nanoseného inkoustu při teplotě až 120 °C. Zařízení dále obsahuje kamerový systém s možností měření a online kontroly depozice materiálu, 700 mW laser vlnové délky 830 nm, který pracuje v kontinuálním režimu a slouží pro selektivní vytvrzování inkoustů. Zařízení dále obsahuje plasmový systém pro úpravu povrchu substrátů. Systém byl dodán společností Relyon Plasma®, jedná se o model PB3, který je určen pro jemné čištění a aktivaci povrchů substrátů, disponuje velkým výkonem a je vhodný pro rychlé procesy. Na Obr. 4.2 je vyfocen systém Aerosol Jet s popsányými jednotlivými prvky (PA – pneumatický atomizér, VI – virtual impactor, B1 – bubbler pro PA, UA – ultrazvukový atomizér, B2 – bubbler pro UA).[10][40]



Obr. 4.2: Systém Aerosol Jet Printing a jeho jednotlivé části (převzato z [10])

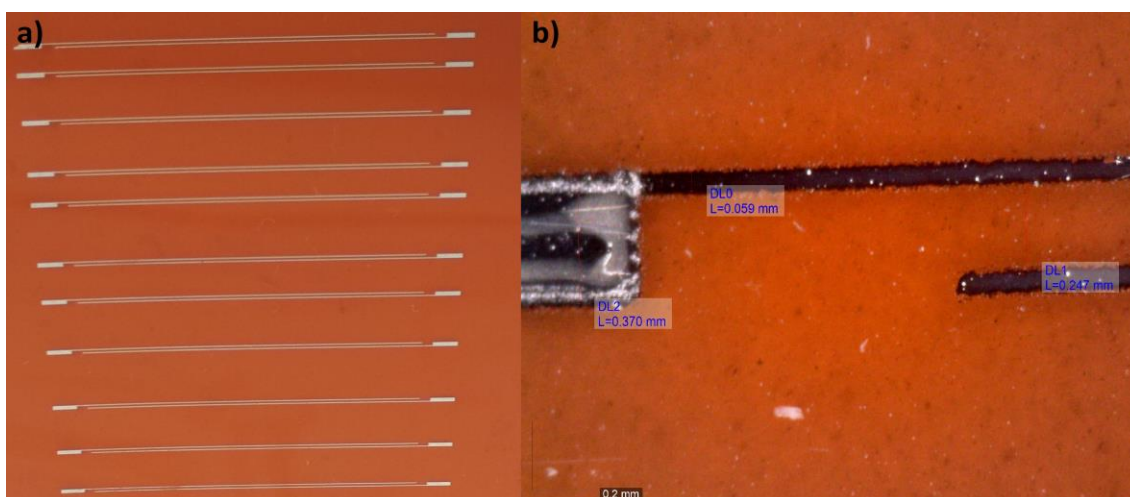
Před samotným tištěním navrženého motivu bylo nejdříve nutné se s celým zařízením seznámit a otestovat oba vodivé inkousty. I když je inkoust vyroben přímo pro zařízení Aerosol Jet, není zaručeno, že se inkoust povede natisknout na první pokus a už vůbec není zaručeno, že natištěné linie budou dostatečně kvalitní. Kvalitně natištěná linie by měla být tvořena dostatečným množstvím inkoustu, po vytvrzení by měl inkoust tvořit jednolitou vrstvu bez mezer, avšak linie by se neměla roztékat do stran vlivem přílišného množství inkoustu. Linie by ideálně měla mít ostré hrany bez přítomnosti rozstříku a měla by být v celé délce stejně široká, nemělo by docházet k unášení příliš velkých kapiček inkoustu, které způsobují nehomogenitu při nanášení inkoustu.

Pro tištění vodivé vrstvy byl použit ultrazvukový atomizér, a to především díky potřebě malého množství inkoustu. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.1, inkoustu je potřeba jen 1 ml. Dále byla použita keramická tryska o průměru 200  $\mu\text{m}$ , která je vhodná pro nanášení drobných motivů. První pokusy o nanášení vodivých inkoustů byly provedeny bez jakékoliv úpravy inkoustů a povrchu substrátů. Povedlo se nanést jen malé množství inkoustu, které nebylo ani zdaleka dostačující pro vytvoření senzoru na vlákně. Malá kvalita tisku byla způsobena špatnou atomizací inkoustu v atomizéru, což se projevilo malým množstvím inkoustu, který se dostával do trysky. Rozdíl mezi nekvalitní linií s malým množstvím inkoustu a kvalitní linií zobrazuje Obr. 4.3.



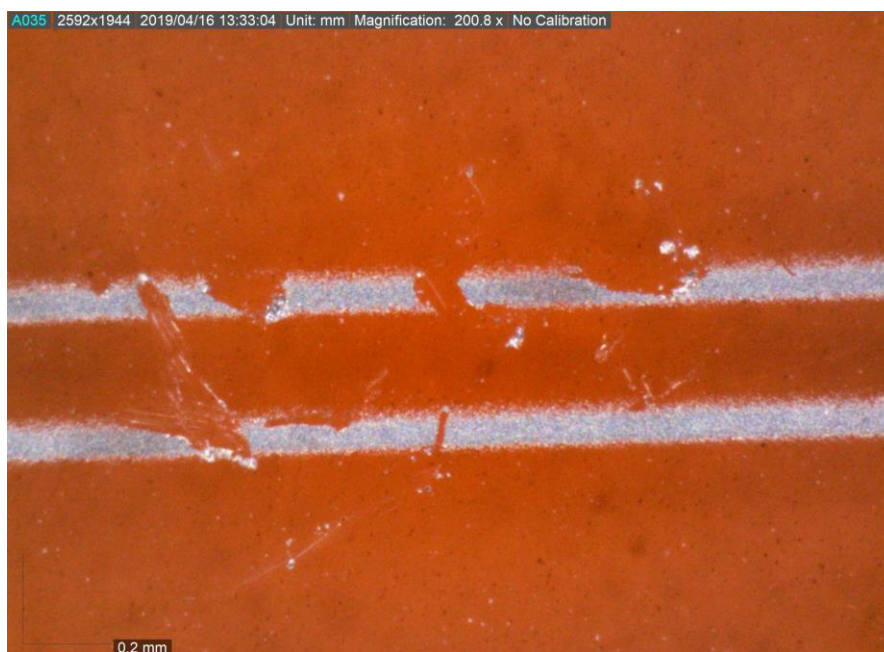
Obr. 4.3: a) nekvalitní linie s malým množstvím inkoustu b) ukázka kvalitní linie

Pro lepší atomizaci inkoustu byl připojen před atomizér bubbler, který dodává do inkoustu malé množství rozpouštědla a tím zlepšuje atomizaci. V případě inkoustu od společnosti Clariant (PRELECT<sup>®</sup> TPS 50G2), byla do bubbleru dána demineralizovaná voda, pro inkoust od společnosti Xerox (xcm-nsUA1) byl použit toluen. Použití bubbleru zlepšilo atomizaci obou inkoustů, avšak u inkoustu PRELECT<sup>®</sup> nebyla atomizace stále dostačující. Proto byl inkoust před použitím naředěn demineralizovanou vodou v poměru 1:1 (0,5 ml inkoustu na 0,5 ml vody). Naředěním inkoustu byla snížena jeho viskozita, což mělo pozitivní vliv na jeho atomizaci. Po připojení bubbleru, respektive po připojení bubbleru a naředění inkoustu se již povedlo natisknout kvalitní linie. Byla dosažena šířka linie 60  $\mu\text{m}$  pro Xerox a 86  $\mu\text{m}$  pro Clariant. Šířka vodivé plošky a tím i šířka celého natištěného motivu byla zhruba 400  $\mu\text{m}$ . Na Obr. 4.4 je vidět několik natištěných senzorů inkoustem Xerox na substrátu Kapton<sup>®</sup> a detail jednoho senzoru.



Obr. 4.4: a) Natištěné senzory inkoustem Xerox na substrátu Kapton<sup>®</sup> b) detail senzoru

Po natištění motivů bylo nutné vzorky vytvrdit, čímž bylo dosaženo finálních vlastností inkoustů. Pro vytvrzení byla použita elektrická pec. Při vytvrzení dochází k vypařování rozpouštědla inkoustu a zároveň ke spojení jednotlivých nanočástic, ze kterých je inkoust tvořen. Vytvrdit se podařilo jen tři vzorky ze čtyř, neboť inkoust Clariant vyžaduje pro vytvrzení vyšší teploty, než dovoluje substrát Melinex®. Vzorky natištěné inkoustem Xerox byly vytvrzovány při teplotě 130 °C po dobu 30 minut, vzorek s inkoustem Clariant při teplotě 200 °C po stejnou dobu. Vytvrzené vzorky vykazovaly malou hodnotu odporu, ten dosahoval hodnot 40 Ω pro inkoust Clariant a 50–60 Ω pro inkoust Xerox. Při přiložení měřících sond multimetru ale docházelo k odtrhávání inkoustu od substrátu, a tím pádem k přerušení vodivých linií (viz. Obr. 4.5).



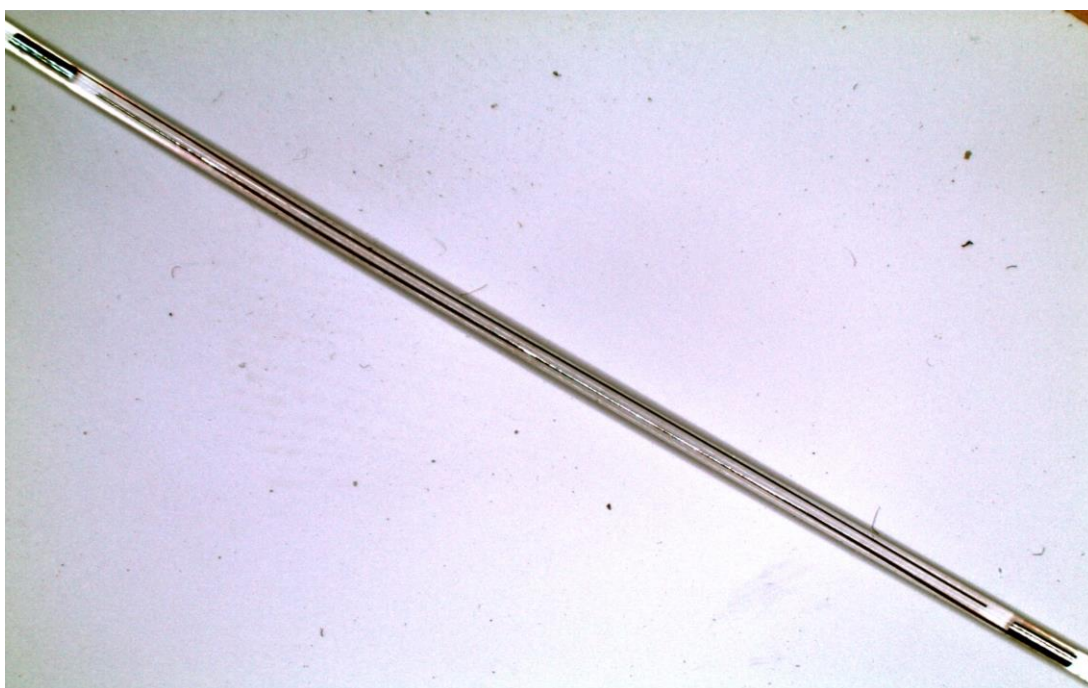
Obr. 4.5: Ukázka odtrhávání vzorků po vytvrzení

Špatná adheze neboli přilnavost inkoustu k substrátu byla zjištěna u všech vzorků, což by byl velký problém při dalším použití. Z tohoto důvodu byly vytvořeny nové vzorky, a to na substráty ošetřené plazmou. Postup výroby byl stejný jako u první sady vzorků, jen již nebyl použit inkoust Clariant v kombinaci se substrátem Melinex®. Po vytvrzení všech vyrobených nových vzorků byla opět zjištěna nedostatečná přilnavost obou inkoustů na substrátu Kapton®, oproti tomu přilnavost inkoustu Xerox na substrátu Melinex® byla dobrá, nedocházelo k odtrhávání inkoustu. Z tohoto důvodu byl pro další postup výroby senzoru na vlákně používán výhradně tento vzorek. Vzorek byl vyroben při následujícím nastavení systému: průtok usměrňovacího plynu – 15 sscm, průtok plynu do atomizéru –



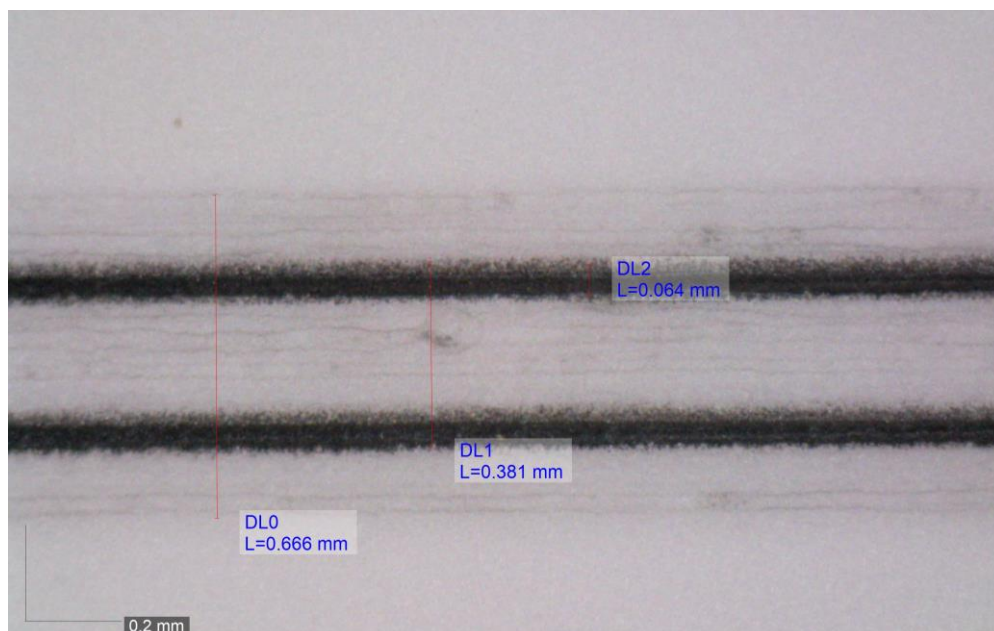
35 sscm, proud ultrazvukového atomizéru – 415 mA, teplota stolku – 80 °C, rychlost tisku – 3 mm/s.

Kromě dříve zmíněných substrátů ve formě folie byl senzor natištěn přímo na vlákno. Bylo použito vlákno o průměru 700  $\mu\text{m}$ , výsledná kvalita natištěných linií je velmi dobrá. Šířka linií je zhruba 60  $\mu\text{m}$  a celková šířka senzoru 380  $\mu\text{m}$ . Natištěný senzor na vlákně ukazuje *Obr. 4.6*. Právě vlákna nebo jiné nerovinné substráty by mohly být v budoucnosti klíčovými substráty při implementaci senzorů do textilií. Dalším krokem by bylo natištění senzoru přímo na textilní vlákno, například na bavlněné vlákno.



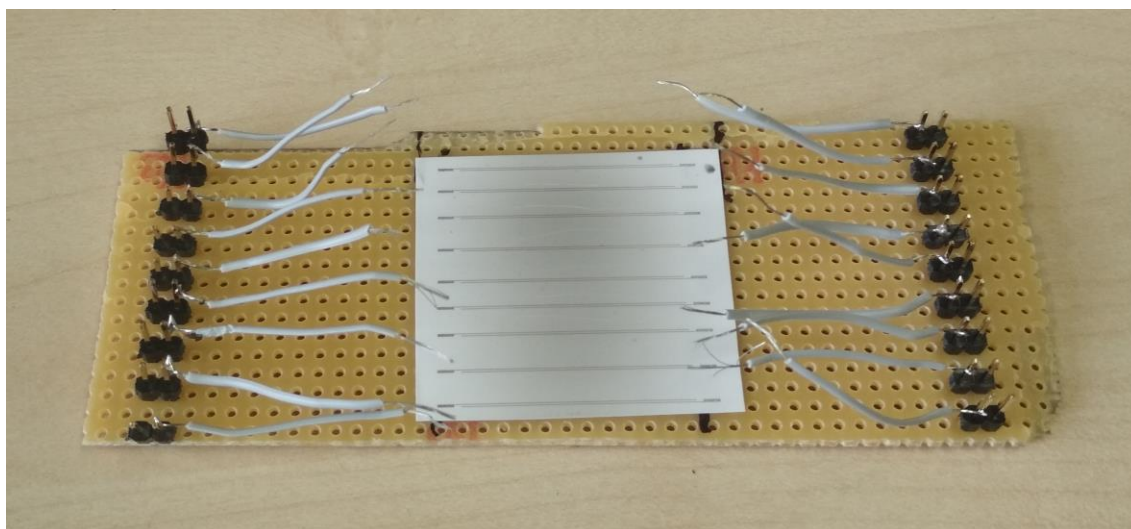
*Obr. 4.6: Natištěný senzor na vlákně o průměru 700  $\mu\text{m}$*

Po vytvoření vodivé vrstvy přišla na řadu vrstva aktivní. K jejímu vytvoření byl opět použit ultrazvukový atomizér, tentokrát bez připojení bubbleru nebo úpravy inkoustu. Disperze redukováného oxidu grafenu byla dobře atomizovatelná na první pokus. Bylo vytvořeno několik vzorků s různým počtem nanesených vrstev aktivní vrstvy (nanesenou aktivní vrstvu ukazuje *Obr. 4.7*). Maximálně bylo natištěno 10 vrstev, avšak ani to nestačilo, aby výsledná nanesená aktivní vrstva byla vodivá, tudíž aby byl senzor funkční. Tento problém pomohlo vyřešit použitím Airbrush Spray namísto technologie Aerosol Jet, Airbrush Spray byl již dříve otestován při nanášení inkoustu na bázi grafenu. Po nanesení více než deseti vrstev byla aktivní vrstva již vodivá a tím pádem byl senzor funkční.



Obr. 4.7: Ukázka nanesené aktivní vrstvy

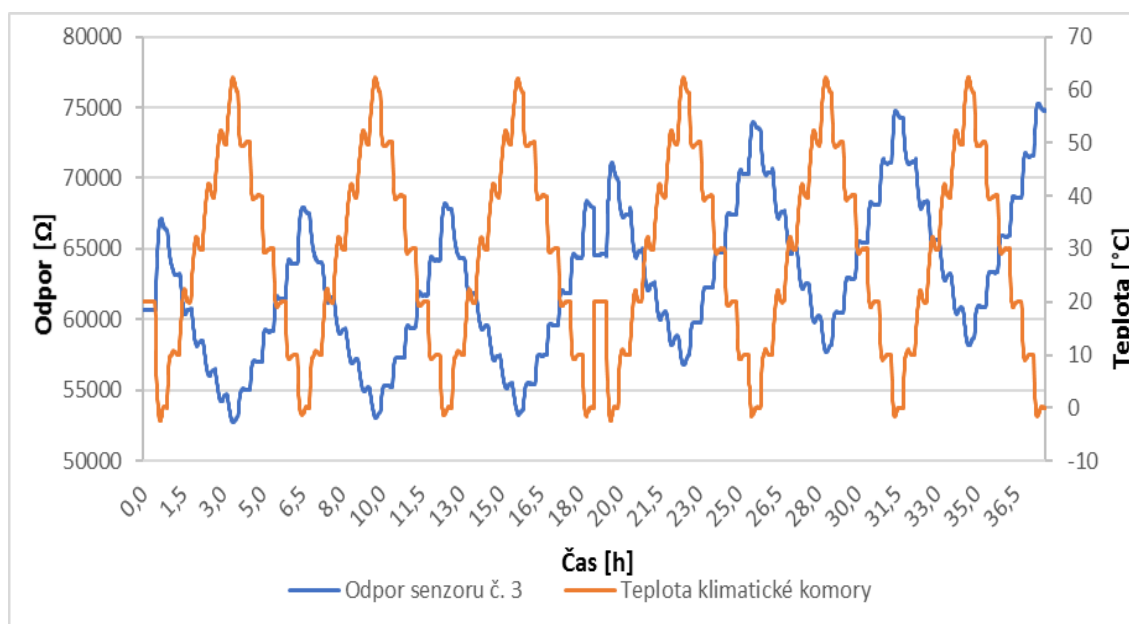
Následně bylo nutné vytvořené vzorky otestovat a zjistit, jak reagují na změnu teploty. Byla vytvořena jednoduchá konstrukce, na kterou byly vzorky přilepeny a pomocí drátků a vodivého lepidla spojeny s vodivými ploškami senzorů. Druhý konec drátků byl připájen na vodivé piny, které byly připájeny k vodivému substrátu konstrukce. Výslednou konstrukci s natištěnými vzorky zobrazuje Obr. 4.8.



Obr. 4.8: Vytvořená konstrukce s natištěnými vzorky

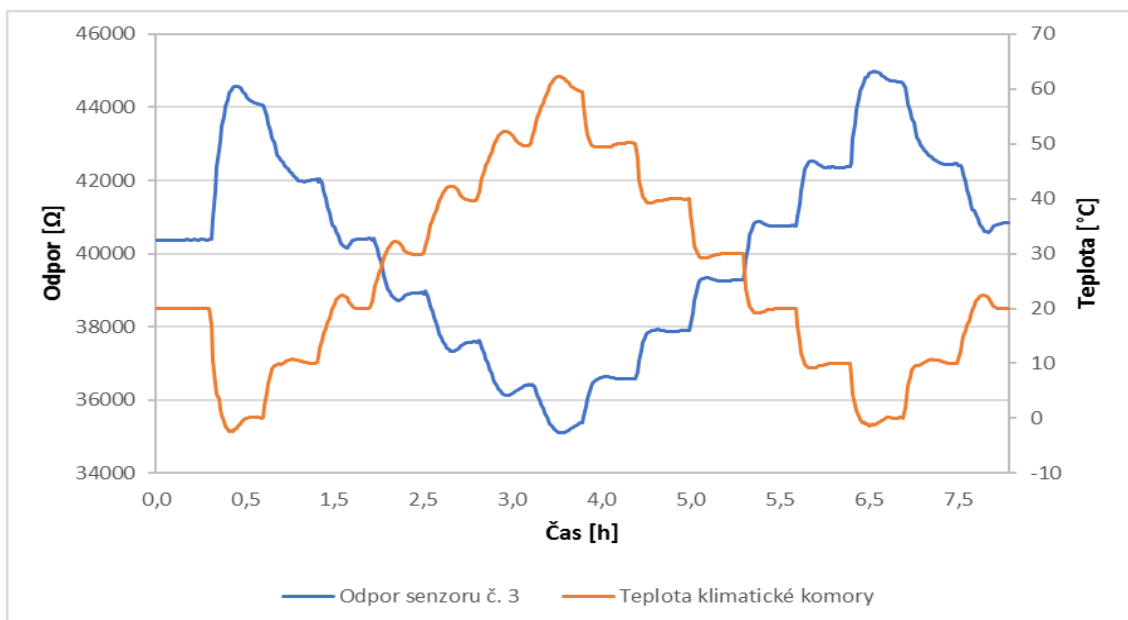
## 5 Zhodnocení výsledků

Z celkového počtu devíti natištěných senzorů se povedlo pro měření přichystat pět funkčních senzorů. Vytvořené senzory byly zkoušeny v klimatické komoře, zkoušení bylo rozděleno do třech částí. V první části byla nastavena konstantní relativní vlhkost 10 %, byl zvolen teplotní profil s krokem 10 °C, jeden teplotní krok trval 30 minut. K zaznamenávání hodnot odporu docházelo každou minutu, tudíž během jednoho teplotního kroku bylo zaznamenáno 30 hodnot. Teplota se měnila v rozsahu od 0 °C od 60 °C, provedeny byly celkově tři cykly (0 °C → 60 °C → 0 °C). Druhá část měření probíhala obdobně jako první část, jen byla zvýšena hodnota relativní vlhkosti na 50%. Všechno ostatní bylo stejné jako při první části. *Graf 5.1* zobrazuje naměřené hodnoty odporu v závislosti na změně teploty při obou hodnotách konstantní relativní vlhkosti, celkové měření trvalo 38 hodin.



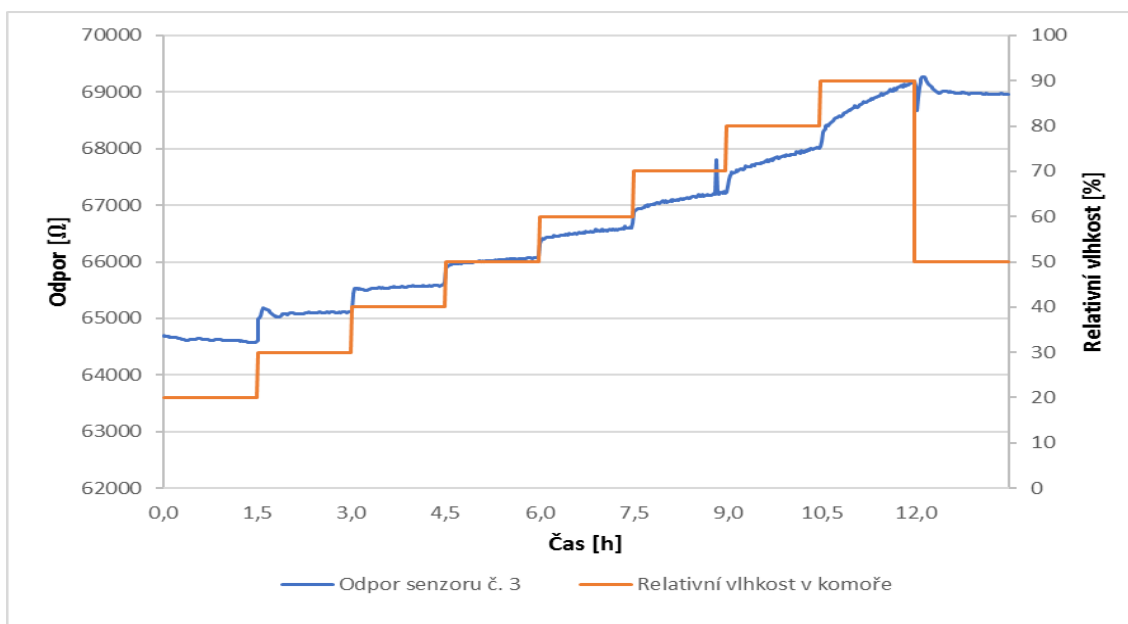
Graf 5.1: Závislost odporu senzoru č. 3 na změně teploty při konstantní vlhkosti

Následující graf zobrazuje detail změny odporu senzoru č.3 na změně teploty během jednoho cyklu. Lze na něm dobře vidět, že se odpor senzoru mění téměř stejně, jak se měnila teplota v klimatické komoře, senzor má tedy dobré dynamické vlastnosti.



Graf 5.2: Detail závislosti odporu senzoru č. 3 na teplotě během jednoho cyklu

Ve třetí části měření byla místo relativní vlhkosti nastavena konstantní teplota, jejíž hodnota byla 30 °C. Naopak byla měněna hodnota relativní vlhkosti, byl zvolen profil s krokem 10 %, hodnota relativní vlhkosti se postupně zvedala z hodnoty 20 % až na hodnotu 90 %. Délka jednoho kroku byla 90 minut. Výslednou závislost odporu senzoru č. 3 na změně relativní vlhkosti zobrazuje Graf 5.3.



Graf 5.3: Závislost odporu senzoru č. 3 na změně relativní vlhkosti při konstantní teplotě 30 °C

Z výsledků měření lze vidět, že senzory vykazují záporný teplotní koeficient, čím vyšší byla teplota, tím nižší odpor byl zaznamenán. Hodnota odporu byla pro jednotlivé senzory různá, nejvyšší odpor měl senzor č. 1, hodnota se pohybovala kolem 400 k $\Omega$ . Naopak nejnižším odporem, kolem 40 k $\Omega$ , disponuje senzor č.5. Tyto rozdílné hodnoty mohly být způsobené rozdílností snímací vrstvy u jednotlivých senzorů, vrstva mohla být různě homogenní. Z grafů lze dále vyčíst vysoká dynamika senzorů, změna teploty se velmi rychle projevila změnou odporu. Můžeme vidět, že charakteristiky teploty v klimatické komoře a odporu senzorů jsou téměř totožné jen zrcadlově otočeny. Při více měřících cyklech byly zjištěny jen minimální odchylky ve vlastnostech senzoru, z tohoto zjištění lze konstatovat, že senzory disponují dobrou opakovatelností. Z grafu 5.3 (závislost odporu na vlhkosti) je vidět, že odpor roste se stoupající vlhkostí, ale nárůst není tak markantní. Senzory mají relativně malou závislost na relativní vlhkosti. Vypočtená citlivost senzoru na relativní vlhkost je 6,9 %.

## Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na funkční struktury realizované pomocí systému Aerosol Jet printing. Mezi hlavní části práce patří popis selektivních bezkontaktních metod pro nanášení nanočásticových inkoustů, největší část byla věnována systému Aerosol Jet. Dále se byla provedena rešerše současného stavu teplotních senzorů na vláknech. Stěžejní část práce byla věnována návrhu a realizaci teplotních senzorů na vláknech, které byly otestovány a výsledky měření kriticky zhodnoceny.

Aerosol Jet je moderní tisková technologie pro nanášení funkčních inkoustů na substrát přinášející několik unikátních vlastností a výhod. Funkční inkousty jsou nanášeny na substrát ve formě aerosolu, který vzniká v pneumatickém nebo ultrazvukovém atomizéru a je prstencově usměřňován fokusačním plynem. Výhody tohoto systému jsou velikost nanesených linií, která může být až 10  $\mu\text{m}$ , možnost tisku na flexibilní a nerovinné substráty, použití široké škály substrátů a funkčních inkoustů a jednoduchost ovládní a návrhu motivu v CAD systémech.

Implementace elektronických zařízení do textilií je v současnosti stále více skloňovaným tématem, smart textilie postupně nacházejí uplatnění v praktickém využití, to samé platí i pro teplotní senzory na vláknech. Ty lze rozdělit do několika skupin, jsou to konvenční termistory na vláknech, teplotu snímající struktury obsahující kovový drátek, senzory na bázi uhlíkových nanotrubic a senzory na bázi grafenu. Jako jejich konkrétní využití lze zmínit měření teploty otoků u pacientů s pokročilým stádiem cukrovky. Teplotní senzory na vláknech by měly být snadno implementovatelné do textilií a jejich uživatel by o jejich přítomnosti neměl vědět. Přesně tyto požadavky splňují tištěné teplotní senzory na vláknech, kterým se věnovala hlavní část diplomové práce.

V praktické části byl navrhnout, vytvořen a otestován teplotní sensor na vláknech. Motiv senzoru tvoří dvojice kolineárních elektrod (vodivá vrstva), které jsou překryty aktivní vrstvou. K natištění senzoru byl použit systém Aerosol Jet a byly použity dva substráty ve formě folie. Kolineární elektrody byly vytvořeny pomocí dvou stříbrných vodivých inkoustů, na aktivní vrstvu byl použit funkční inkoust na bázi grafenu. Ze všech kombinací substrát-inkoust byla vybrána jako nejlepší kombinace substrát Melinex® s inkoustem od

společnosti Xerox. Tato kombinace disponuje dobrou vodivostí a především adhezí. K nanesení aktivní vrstvy byl nakonec použit Airbrush Spray, jelikož se pomocí Aerosol Jet nepovedlo nanést dostatečnou vrstvu, která by byla vodivá. Testování vzorků bylo provedeno v klimatické komoře a skládalo se ze tří částí, při prvních dvou byla nastavena a udržována konstantní relativní vlhkost (10 a 50 %), ve třetí části byla konstantní teplota a měnila se vlhkost. Výsledná hodnota odporu senzorů se pohybovala v širokém rozmezí od 40 k $\Omega$  až do 400 k $\Omega$ . Vytvořené senzory mají záporný teplotní koeficient, s rostoucí teplotou klesá jejich odpor. Výsledky měření ukazují, že tištěné senzory reagují poměrně rychle na změnu teploty, disponují vysokou opakovatelností a jsou jen málo závislé na změně relativní vlhkosti. Byla vypočtena citlivost senzoru na relativní vlhkost, jejíž výsledná hodnota je 6,9 %.

Senzor byl kromě rovinných substrátů natištěn i na nerovinný substrát, konkrétně na vlákno o průměru 700  $\mu\text{m}$ . Bylo dosaženo dobré kvality natištěného senzoru, což by společně s výše uvedenými vlastnostmi senzorů na rovinných substrátech mohlo být klíčové pro budoucí využití. Právě tisk miniaturních senzorů s vlastnostmi podobnými jako mají konvenční zařízení přímo na textilní vlákna, by mohl být dalším krokem pro implementaci elektroniky do textilií. Takzvané smart textilie by mohly nalézt své uplatnění ve zdravotnictví nebo u povolání, kdy je nutné hlídat teplotu těla kvůli vystavení vysokým teplotám. Při implementaci elektroniky do textilií se mohou objevovat nové překážky, a to například riziko vyššího mechanického opotřebení nebo zničení zařízení při čištění textilie.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] 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. ISSN 1530437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2014.2375203
- [2] RU, Changhai, Jun LUO, Shaorong XIE a Yu SUN. A review of non-contact micro- and nano-printing technologies. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2014, 24(5). ISSN 13616439. Dostupné z: doi:10.1088/0960-1317/24/5/053001
- [3] XU, Jun. Novel method for printing high-quality metal wires. *SPIE Newsroom* [online]. 2007 [vid. 2019-03-04]. ISSN 18182259. Dostupné z: doi:10.1117/2.1200712.0969
- [4] BARTON, Kira, Sandipan MISHRA, K. Alex SHORTER, Andrew ALLEYNE, Placid FERREIRA a John ROGERS. A desktop electrohydrodynamic jet printing system. *Mechatronics* [online]. 2010, 20(5), 611–616. ISSN 09574158. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechatronics.2010.05.004
- [5] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektrotechnice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [6] SKOČIL, Vlastimil. *Diferenciace*, prezentace z předmětu KET/TEL. *Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická*. 2015.
- [7] SIBINSKI, Maciej, Malgorzata JAKUBOWSKA a Marcin SLOMA. Flexible Temperature Sensors on Fibers [online]. 2010, 7934–7946. Dostupné z: doi:10.3390/s100907934
- [8] OPTOMECC. *The Technology Behind Aerosol Jet* [online]. 2017 [vid. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/>
- [9] OPTOMECC. *Aerosol Jet® Printed Electronics Overview* [online]. nedatováno. Dostupné z: [http://www.optomec.com/wpcontent/uploads/2014/04/AJ\\_Printed\\_Electronics\\_Overview\\_whitepaper.pdf](http://www.optomec.com/wpcontent/uploads/2014/04/AJ_Printed_Electronics_Overview_whitepaper.pdf)
- [10] HW.CZ. *Aerosol Jet printing aneb když tranzistor prochází tryskou* [online]. 2015 [vid. 2018-11-10]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [11] NAVRÁTIL, Jiří (ed.). *Možnosti systému Aerosol Jet®*. In: FIŘT, Jaroslav. *Elektrotechnika a informatika 2015: Sborník konference*. První. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015, s. 87-90. ISBN 978-80-261-0514-5.
- [12] BRITANNICA, Encyclopædie. *Aerosol* [online]. 2018 [vid. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/aerosol>



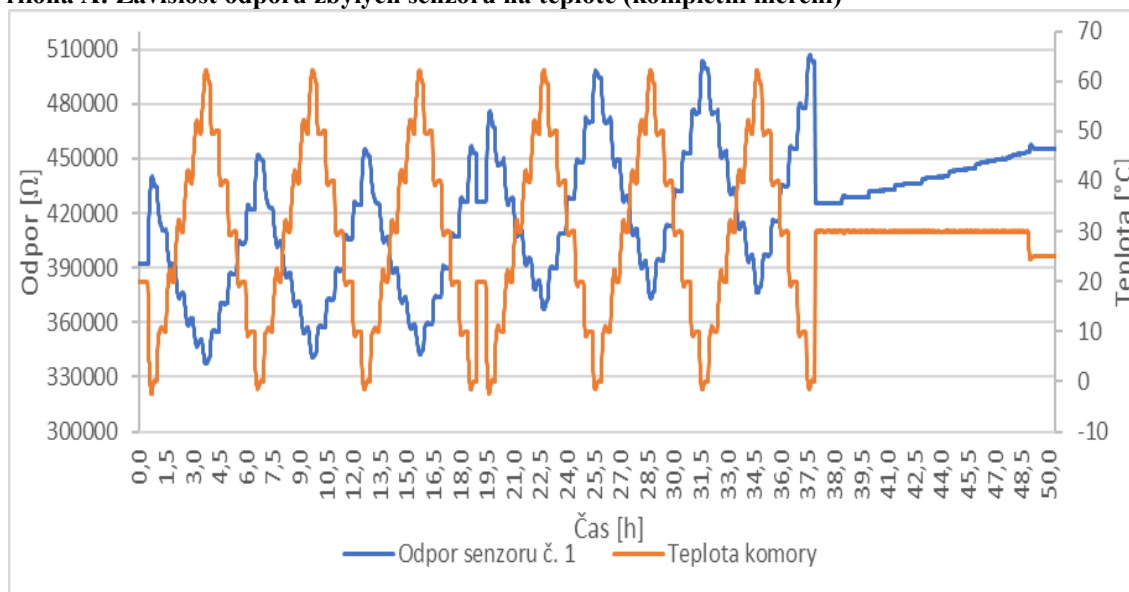
- [13] CLIFFORD, Ben, David BEYNON, Christopher PHILLIPS a Davide DEGANELLO. Printed-Sensor-on-Chip devices – Aerosol jet deposition of thin film relative humidity sensors onto packaged integrated circuits. *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 2018, 255, 1031–1038 [vid. 2019-03-06]. ISSN 0925-4005. Dostupné z: doi:10.1016/J.SNB.2017.08.086
- [14] SOUKUP, Radek, Jiri NAVRATIL, Jan REBOUN a Tomas RERICHA. A comparison of the interdigital electrodes prepared by aerosol jet printing and lift-off technique. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology* [online]. 2015, 2015–Septe, 30–35. ISSN 21612536. Dostupné z: doi:10.1109/ISSE.2015.7247956
- [15] BRITANNICA, Encyclopædie. *Viscosity* [online]. 2018 [vid. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/viscosity>
- [16] NAVRATIL, Jiri, Ales HAMACEK, Jan REBOUN a Radek SOUKUP. Perspective methods of creating conductive paths by Aerosol Jet Printing technology. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology* [online]. 2015, 2015–Septe, 36–39. ISSN 21612536. Dostupné z: doi:10.1109/ISSE.2015.7247957
- [17] GOTH, Christian, Sonja PUTZO a Joerg FRANKE. Aerosol Jet printing on rapid prototyping materials for fine pitch electronic applications. *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference* [online]. 2011, 1211–1216. ISSN 05695503. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2011.5898664
- [18] REITBERGER, T a J HOERBER. Aerosol Jet® printing of optical waveguides. ... (ISSE), 2015 38th ... [online]. 2015. ISSN 21612536. Dostupné z: doi:10.1109/ISSE.2015.7247951
- [19] MEDDEB, A. Barhoumi, Z. OUNAIES a M. LANAGAN. Enhancement of electrical properties of polyimide films by plasma treatment. *Chemical Physics Letters* [online]. 2016, 649, 111–114 [vid. 2019-03-07]. ISSN 0009-2614. Dostupné z: doi:10.1016/J.CPLETT.2016.02.037
- [20] ENERCONIND. *Adhesives Applications Plasma and Flame Treatment - Enercon Industries* [online]. [vid. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.enerconind.com/plasma-treating/applications/adhesives.aspx>
- [21] OPTOMEC. *Aerosol Jet materials faqs* [datasheet]. 2014 [vid. 2019-03-07]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/>
- [22] GOH, Guo Liang, Shweta AGARWALA, Yu Jun TAN a Wai Yee YEONG. A low cost and flexible carbon nanotube pH sensor fabricated using aerosol jet technology for live cell applications. *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 2018, 260, 227–235 [vid. 2019-03-06]. ISSN 0925-4005. Dostupné z: doi:10.1016/J.SNB.2017.12.127
- [23] CANTÙ, Edoardo, Sarah TONELLO, Giulia ABATE, Daniela UBERTI, Emilio SARDINI, Mauro SERPELLONI, Edoardo CANTÙ, Sarah TONELLO, Giulia ABATE, Daniela UBERTI, Emilio SARDINI a Mauro SERPELLONI. Aerosol



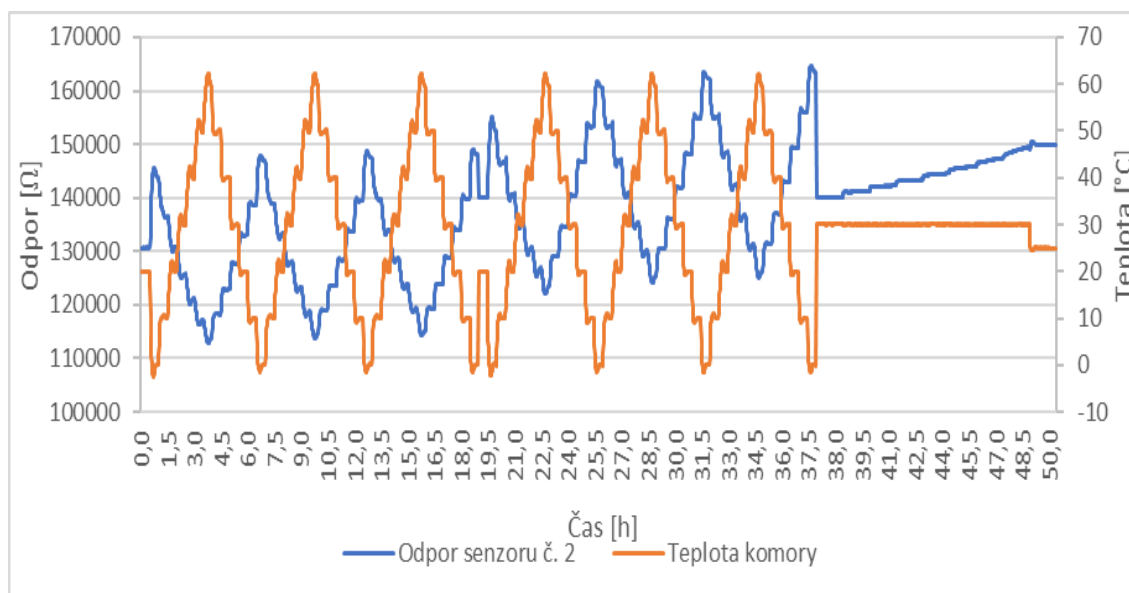
- TRANSMISSION, Whiteness WHITENESS, Physical DENSITY a Density DENSITY. Product Description Disclaimer. 2016, 1–2.
- [36] CLARIANT. *Nano silver conductive ink for Aerosol Jet application* [online]. 2019 [vid. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.clariant.com/en/Solutions/Products/2018/12/13/13/05/PRELE-CT-TPS-50G2>
- [37] XEROX. *Xerox Silver Nanoparticle Ink* [online]. 2019 [vid. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://xrcc.external.xerox.com/electronic-materials.html>
- [38] SEHRAWAT, Poonam, ABID, S. S. ISLAM a Prabhash MISHRA. Reduced graphene oxide based temperature sensor: Extraordinary performance governed by lattice dynamics assisted carrier transport. *Sensors and Actuators, B: Chemical* [online]. 2018, 258, 424–435. ISSN 09254005. Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2017.11.112
- [39] SATYAPRAKASH SAHOO G. L. SHARMA, GEETIKA KHURANA, J. F. SCOTT, RAM S. KATIYAR, Sujit K Barik. Reduced graphene oxide as ultra fast temperature sensor. *Http://Arxiv.Org/Abs/1204.1928V2*. 2012, 2(1), 1–5.
- [40] OPTOMECC. *Aerosol Jet 300 series systems* [online]. 2017, 4–5. Dostupné z: <https://www.optomecc.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ-300-Systems-Web0417.pdf>

# Přílohy

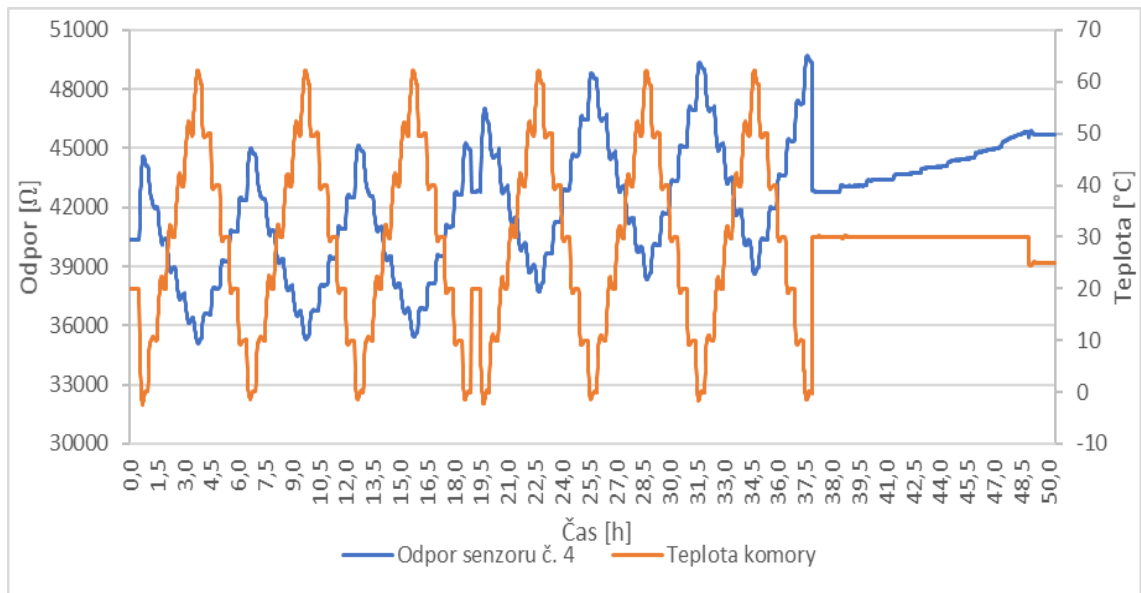
## Příloha A: Závislost odporu zbylých sensorů na teplotě (kompletní měření)



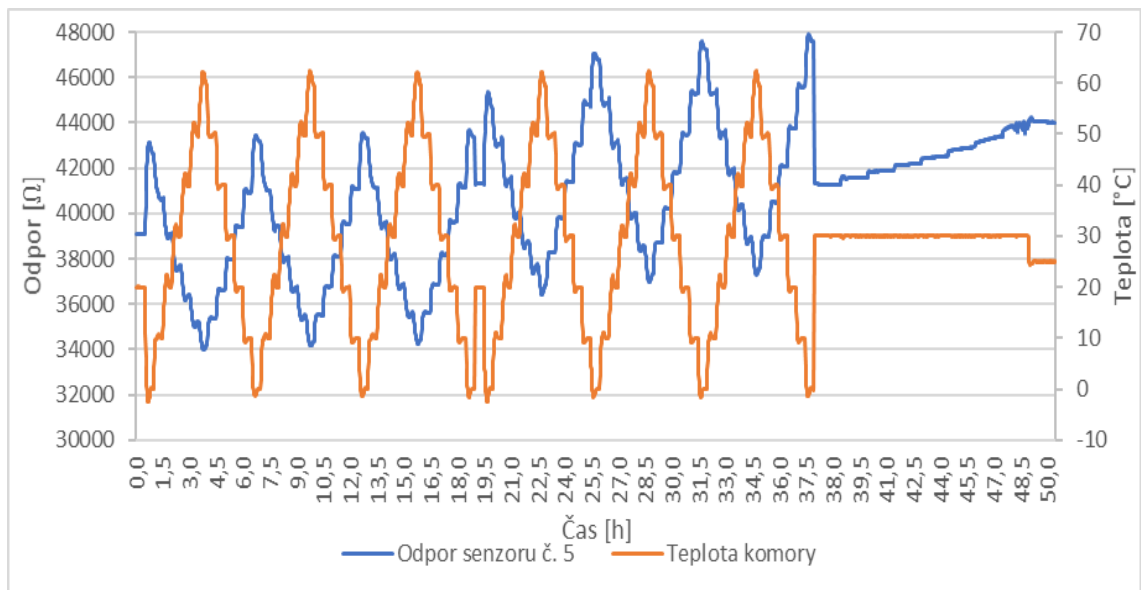
Graf 1: Závislost odporu senzoru č. 1 na teplotě



Graf 2: Závislost odporu senzoru č. 2 na teplotě



Graf 3: Závislost odporu senzoru č. 4 na teplotě



Graf 4: Závislost odporu senzoru č. 5 na teplotě