

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Elektrické vyhřívací elementy**

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Kamila KALOUSOVÁ**  
Osobní číslo: **E18B0177P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Téma práce: **Elektrické vyhřívací elementy**  
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

### Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši vyhřívacích struktur a jejich aplikace, zhodnoťte jejich výhody a nedostatky.
2. Seznamte se s technologií Aerosol Jet a detailně ji popište.
3. Navrhněte vyhřívací struktury v programu AutoCAD a natiskněte je vybraným materiálem technologií Aerosol Jet.
4. Změřte a vyhodnoťte parametry zhotovených struktur.

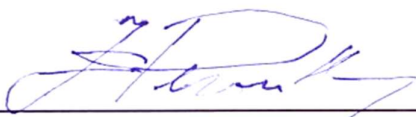
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

## Seznam doporučené literatury:

1. Goth, C.; Putzo, S.; Franke, J., „Aerosol Jet printing on rapid prototyping materials for fine pitch electronic applications,“ Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2011 IEEE 61st , vol., no., pp.1211,1216, May 31 2011-June 3 2011 doi: 10.1109/ECTC.2011.5898664
2. Jeffrey G. Tait, Ewelina Witkowska, Masaya Hirade, Tung-Huei Ke, Pawel E. Malinowski, Soeren Steudel, Chihaya Adachi, Paul Heremans, Uniform Aerosol Jet printed polymer lines with 30 µm width for 140 ppi resolution RGB organic light emitting diodes, Organic Electronics, Volume 22, July 2015, Pages 40-43, ISSN 1566-1199, <http://dx.doi.org/10.1016/j.orgel.2015.03.034>.

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

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



---

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

L.S.



---

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

**Dodatek k zadání Bakalářské práce**  
**Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni v akademickém roce 2020/2021**

V souvislosti s krizovým opatřením vyhlášeným dle krizového zákona a mimořádným opatřením vydaným podle zvláštního zákona, na základě kterých došlo k omezení osobní přítomnosti studentů v prostorách vysoké školy a s ohledem na nutnost využití infrastruktury FEL při vypracování kvalifikační práce v období tohoto omezení a v plné míře s přihlédnutím k realizovatelnosti práce po dobu trvání tohoto omezení se v intencích čl. 54 odst. 4 Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni upravuje zadání práce takto:

Body 1., 2. zůstávají v plném rozsahu.

Bod 3. Navrhněte vyhřívací struktury v programu AutoCAD a natiskněte je vybraným materiálem technologií Aerosol Jet.

je změněn na:

Uveďte příklady materiálů využívaných pro tvorbu elektrických vyhřívacích elementů.

Bod 4. Změřte a vyhodnoťte parametry zhotovených struktur.

je změněn na:

Popište vybrané aplikace vyhřívacích struktur a práci shrňte.

Beru na vědomí a souhlasím.

V Plzni dne 24.5. 2021

V Plzni dne 20.5. 2021



.....  
Vedoucí práce:



.....  
Student:

V Plzni dne



prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické  
Západočeské univerzity v Plzni

**Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na možnosti elektrického ohřevu, technologii Aerosol Jet a její využití při tisku elektrických vyhřívacích elementů. Dále jsou v této práci uvedeny některé aplikace elektrického ohřevu v automobilovém průmyslu a letectví. Zároveň jsou zde uvedeny používané materiály v technologii Aerosol Jet a v některých typech elektrického ohřevu.

**Klíčová slova**

Elektrické vyhřívání, Aerosol Jet, elektrický ohřev, inkoust, substrát, pece, teplo

**Abstract**

The bachelor thesis is focused on the electric heating options, Aerosol Jet technology and heating elements printed by this technology. This thesis describes some application of electric heating in automotive and aerospace. It also describes materials that are used with Aerosol Jet and materials used for some types of electric heating.

**Key words**

Electric heating, Aerosol Jet, ink, substrate, furnaces, heat

## **Prohlášení**

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Kamila Kalousová

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu této bakalářské práce Ing. Jiřímu Navrátilovi, za cenné profesionální rady, připomínky, trpělivost a vstřícnost při konzultacích.

Velké poděkování také patří mé rodině a mým nejbližším za veškerou podporu, kterou mi poskytovali za všech okolností v průběhu celého mého studia a za to, že mi umožnili studovat.



# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>12</b>
<b>1 TEPLO A JEHO PŘENOS</b> .....	<b>13</b>
1.1 VEDENÍ (KONDUKCE) .....	13
1.2 PROUDĚNÍ (KONVEKCE) .....	14
1.3 VYŽAŘOVÁNÍ (SÁLÁNÍ) .....	14
1.4 ANALOGIE MEZI POLEM TEPLOTNÍM A ELEKTRICKÝM .....	15
<b>2 ELEKTRICKÉ VYHŘÍVÁNÍ</b> .....	<b>16</b>
2.1 HISTORIE .....	16
2.2 ELEKTRICKÝ OHŘEV ODPOROVÝ .....	16
2.2.1 <i>Přímý odporový ohřev</i> .....	17
2.2.2 <i>Nepřímý odporový ohřev</i> .....	18
2.3 ELEKTRICKÝ OHŘEV OBLOUKOVÝ .....	18
2.4 ELEKTRONOVÝ OHŘEV .....	19
2.5 OHŘEV POMOCÍ INFRAZÁŘIČŮ .....	20
2.6 INDUKČNÍ OHŘEV .....	21
2.7 DIELEKTRICKÝ OHŘEV .....	23
2.7.1 <i>Mikrovlnný ohřev</i> .....	23
2.8 PLAZMOVÝ OHŘEV .....	23
2.9 OHŘEV POMOCÍ LASERŮ .....	24
<b>3 AEROSOL JET</b> .....	<b>25</b>
3.1 HISTORIE .....	25
3.2 PRINCIP AEROSOL JET TECHNOLOGIE .....	25
3.3 MATERIÁLY .....	28
3.3.1 <i>Substráty</i> .....	28
3.3.2 <i>Inkousty</i> .....	28
3.4 PŘÍKLADY VYUŽITÍ .....	30
3.4.1 <i>Tištěné vyhřívací elementy</i> .....	30
3.5 PŘÍKLADY NÁVRHU TIŠTĚNÉ VYHŘÍVACÍ STRUKTURY .....	31
3.5.1 <i>Základní příprava a použití materiálu</i> .....	31
3.5.2 <i>Tisk a výroba</i> .....	31
3.5.3 <i>Tepelná výkonost a zhodnocení</i> .....	32
<b>4 PŘÍKLADY MATERIÁLŮ VYUŽÍVANÝCH PRO ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>34</b>
4.1 KOVOVÉ KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY .....	34
4.2 NEKOVOVÉ KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY .....	34
4.3 PŘÍKLADY MATERIÁLŮ PRO VÝROBU ELEMENTŮ NĚKTERÝCH TYPŮ OHŘEVŮ .....	35
4.2.1 <i>Nepřímý odporový ohřev</i> .....	35
4.3.2 <i>Indukční ohřev</i> .....	35
4.3.3 <i>Ohřev pomocí infrazářičů</i> .....	35
<b>5 APLIKACE ELEKTRICKÝCH VYHŘÍVACÍCH STRUKTUR</b> .....	<b>37</b>
5.1 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL .....	37
5.1.1 <i>Vyhřívání sedaček</i> .....	37
5.1.2 <i>Vyhřívání volantu</i> .....	38

5.1.3	<i>Vyhřívání oken</i> .....	39
5.1.4	<i>Vyhřívání podlahy</i> .....	39
5.2	LETECKÝ PRŮMYSL.....	40
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>42</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>44</b>

## Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na elektrické teplo, jeho využití, druhy elektrického ohřevu, elektrotepelným zařízením a technologii Aerosol Jet a její použití při výrobě tištěných vyhřívacích struktur.

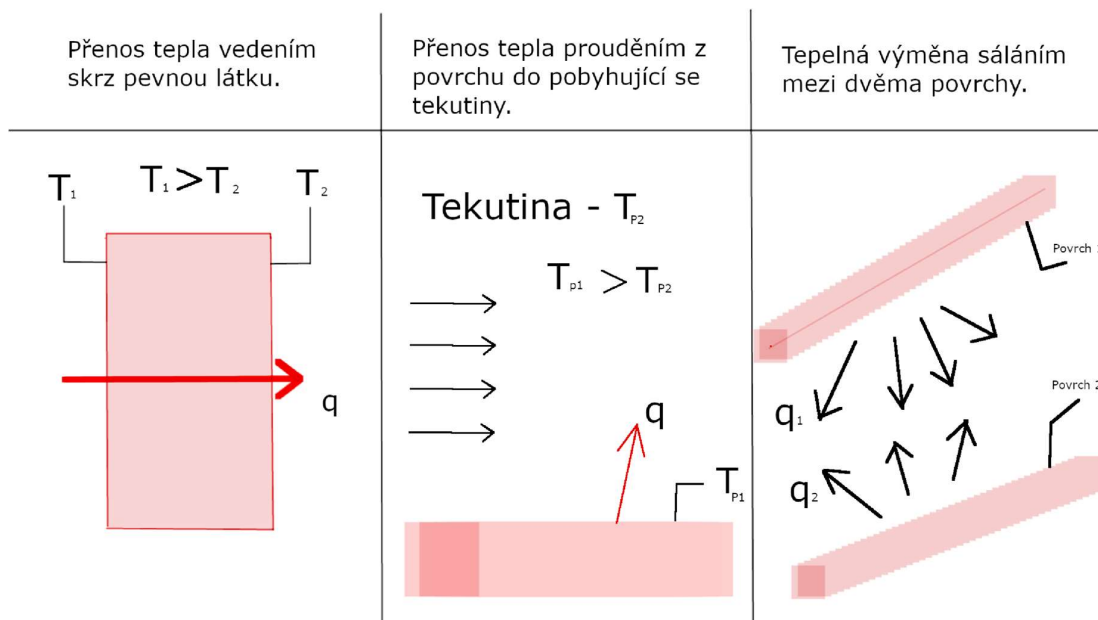
Text je rozdělen do pěti částí; první část se zabývá přenosem tepla, druhá část je věnována elektrickému ohřevu a jeho rozdělení. Třetí část popisuje technologii Aerosol Jet, její využití a inkousty, které se při tisku používají. Čtvrtá část je věnována materiálům, které se používají při konstrukci elektrotepelných zařízení a poslední pátá část je zaměřena na dvě vybrané oblasti využití elektrických vyhřívacích struktur, kterými jsou automobilový a letecký průmysl.

## Seznam symbolů a zkratk

$\lambda$ .....	Součinitel tepelné vodivosti [ $W/m \cdot K$ ]
$q'$ .....	Hustota tepelného toku [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$dT/dx$ .....	Teplotní gradient [K/m]
$A$ .....	Plocha [ $m^2$ ]
$Q'$ .....	Tepelný tok (vedení) [W]
$(Q_{proud})$ .....	Tepelný tok (proudění) [W]
$h$ .....	Součinitel přestupu tepla [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]
$T_{P2}$ .....	Teplota tekutiny [K]
$T_{P1}$ .....	Teplota povrchu [K]
$P$ .....	Čistý vyzářený výkon [W]
$e$ .....	Součinitel přestupu tepla [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]
$T_R$ .....	Teplota zářiče [K]
$T_C$ .....	Teplota okolí [K]
$\sigma$ .....	Stefanova-Boltzmanova konstanta ( $5,69 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^4$ )
Ag .....	Stříbro
IR-A .....	Infrazářič typu A
IR-B.....	Infrazářič typu B
IR-C.....	Infrazářič typu C
SU-8 .....	Fotorezist
UV .....	Ultrafialové záření
SWCNTs .....	Uhlíkové nanotrubičky s jednou stěnou
MWCNTs .....	Víceúrovňové uhlíkové nanotrubičky
PEDOT:PSS .....	Vodivý polymer dvou ionomerů

# 1 Teplo a jeho přenos

Teplo je energie, kterou si mezi sebou vyměňují dva systémy o různých teplotách [1]. Při tepelné výměně vždy předává systém s vyšší teplotou energii (teplo) systému s nižší teplotou [1][2][3]. K přenosu tepla dochází ve chvíli, kdy je mezi systémy teplotní rozdíl [4][5]. Teplo se dokáže šířit třemi různými způsoby a to vyzařováním (sáláním), vedením (kondukcí) nebo prouděním (konvekci) [1][4].



Obr. 1 Tepelný přenos vedením, prouděním a vyzařováním (převzato a upraveno z [4])

## 1.1 Vedení (kondukcce)

K přenosu tepla vedením dochází při fyzickém kontaktu [6]. Vedení využívá pohybu molekul, které do sebe vzájemně narážejí a předávají si kinetickou energii. Molekuly s vyšší rychlostí (vyšší kinetickou energií) naráží do molekul s nižší rychlostí a předávají jim tak část své kinetické energie [7]. Přenos tepla vedením se nejčastěji objevuje v pevných látkách [8]. Jednotka, která popisuje kolik energie (tepla) se přenese metrem čtverečním v jedné vteřině je hustota tepelného toku. Tuto jednotku popisuje Fouriérův zákon [4][8]:

$$q' = -\lambda \cdot dT / dx \quad (1)$$

Hodnotu tepelného toku, tedy množství tepla, respektive tepelné energie, která projde danou plochou v čase, je možné získat vynásobením hustoty tepelného toku plochou A [9]:

$$Q' = -\lambda \cdot dT / dx \cdot A \quad (2)$$

Součinitel tepelné vodivosti ( $\lambda$ ) je měřítkem jak daný materiál dokáže vést teplo [7]. Obecně jsou dobrými tepelnými vodiči kovy, obzvláště čisté kovy. Nejvyšší hodnoty však dosahuje diamant, který je z tohoto pohledu nejlépe tepelně vodivý materiál, jeho součinitel tepelné vodivosti je 2000 – 2200  $W/m \cdot K$  [10].

## 1.2 Proudění (konvekce)

K přenosu tepla prouděním dochází primárně v kapalinách a plynech [4]. Je známým faktem, že tekutiny (kapaliny a plyny) se při zahřátí rozpínají. Dochází k tomu z důvodu rychlejšího pohybu částic v tekutinách s vyšší teplotou [11]. Při rozpínání se zároveň snižuje hustota látky, částice z ohřívané části látky díky nižší hustotě stoupají vzhůru a uvolňují prostor pro části látky s vyšší hustotou, dochází tedy k proudění, které odebírá teplo (energii) z teplejší látky a přenáší ho do látky studenější [8][11]. Proudění může být buď přirozené, anebo nucené [7].

- **Přirozené**

Přirozené proudění je popsáno výše. Jde o pohyb tekutiny způsobován vztakovými silami.

- **Nucené**

Nucené proudění je vyvolávané vnějším zdrojem, např. čerpadlem, ventilátorem nebo mixérem [7][8].

Přenos tepla prouděním za jednotku času mezi povrchem o ploše  $A$  a tekutinou popisuje Newtonův ochlazovací zákon [9]:

$$(Q_{proud})' = h \cdot A(T_{P2} - T_{P1}) \quad (3)$$

## 1.3 Vyzařování (sálání)

Tepelné záření je energie vyzařována hmotou, která má nenulovou teplotu [4]. K tepelnému záření dochází pomocí elektromagnetického vlnění. Záření rozlišujeme podle vlnové délky, například na záření rentgenové, ultrafialové nebo infračervené. [9][12]. Na rozdíl od vedení a proudění se teplo může sáláním přenášet i ve vakuu [4]. energii vyzářenou za jednotku času z povrchu  $A$ , který má absolutní teplotu  $T_R$  popisuje Stefanův-Boltzmannův zákon [7]:

$$P = e \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_R^4 - T_C^4) \quad (4)$$

## 1.4 Analogie mezi polem teplotním a elektrickým

Je důležité zmínit podobnost mezi teplotním a elektrickým polem. Tato podobnost usnadňuje výpočty v ustáleném stavu a v jednodušších soustavách. Obě pole jsou nevírová a nezřídlová, platí tedy Laplaceova věta [13].

Tab. 1 Příklady podobnosti mezi elektrickým a teplotním polem (převzato a upraveno z [13] [14])

Pole elektrické	Pole teplotní
Náboj $q$ [C]	Teplo $Q$ [J]
Proud $I$ [A]	Hustota tepelného toku $q$ [J/s]
Odpor $R$ [ $\Omega$ ]	Tepelný odpor $R$ [ $m^2 \cdot K/W$ ]
Napětí $U$ [V]	Teplota $T$ [ $^{\circ}C$ ]
$\frac{1}{C}$	$\frac{1}{C}$
Kapacita $C$ [F]	Tepelná kapacita $C$ [ $J \cdot K^{-1}$ ]
Potenciál Nulový potenciál je v nekonečnu skalární veličina, jednotka [V]	Termodynamická teplota Absolutní nula = - 273,15 $^{\circ}C$ Skalární veličina, jednotka [K]
Napětí $U = U_1 - U_2$ [V]	Teplotní rozdíl $\Delta T = T_1 - T_2$ [K]
Rezistivita $\rho = \frac{1}{\gamma}$ [ $\Omega \cdot m$ ]	Měrný tepelný odpor $\frac{1}{\gamma}$ [ $m \cdot K \cdot W^{-1}$ ]
Elektrická vodivost $G = \frac{\gamma \cdot S}{l}$ [S]	Tepelná vodivost $G = \frac{\gamma \cdot S}{l}$ [ $W \cdot K^{-1}$ ]
Elektrický odpor $R = \frac{l}{\lambda \cdot S} = \frac{\rho \cdot l}{S}$ [ $\Omega$ ]	Tepelný odpor $R = \frac{l}{\lambda \cdot S}$ [ $K \cdot W^{-1}$ ]
Elektrický proud $I = \int_S J \cdot dS$ [A]	Tepelný tok $\phi = \int_S q \cdot dS$ [W]

## 2 Elektrické teplo a vyhřívání

Elektrickým vyhříváním nazýváme jakoukoliv metodu, při které převádíme elektrickou energii na energii tepelnou [15]. V této kapitole je stručně popsána historie elektrického vyhřívání a zároveň jsou zde popsány typy elektrického ohřevu a elektrotepelná zařízení. Typy ohřevu jsou rozděleny na odporový ohřev, obloukový ohřev, ohřev elektronový, ohřev pomocí infrazářičů, indukční ohřev, dielektrický ohřev, mikrovlnný ohřev, plazmový ohřev a ohřev pomocí laserů.

### 2.1 Historie

Historie využití elektrické energie k vyhřívání, respektive ohřívání sahá až do 19. století, přesněji do osmdesátých a devadesátých let 19. století, kdy Thomas A. Edison vynalezl elektrickou žárovku. Tento vynález vedl k vyrobení prvního přenosného elektrického vyhřívacího systému, který nedlouho potom vytvořila americká společnost General Electric. Tento elektrický ohříváč byl vyroben z podlouhlých skleněných žárovek, ze kterých teplo vystupovalo [16][17]. Dalším důležitým, možná i tím nejdůležitějším milníkem pro elektrické vyhřívání byl rok 1905. V tomto roce Albert Marsh objevil chromel (nichrom), slitinu, která se skládá přibližně z 80 % niklu a z 20 % chromu [17][18]. Díky této slitině a její odolnosti vůči vysokým teplotám (bod tání nichromu je 1400 °C) a odolnosti vůči oxidaci bylo umožněno vyrábění mnohem odolnějších drátů, které mohly být použity jako bezpečnější topný element [16][18]. I přes to však elektrické vyhřívání dosahuje největšího růstu až v posledních 50 letech [7].

### 2.2 Elektrický ohřev odporový

Elektrotepelná zařízení odporová využívají ohmického tepla, též nazývaného Jouleovo teplo. Toto teplo je vytvářeno ve vodivých tělesech, kovových i nekovových, kterými prochází elektrický proud [7][19]. Při průchodu proudu dochází ke změně vnitřní energie a následnému zahřívání tělesa. Těleso dosahuje vyšší teploty než má okolí a dochází k tepelné výměně [20][19]. Pro výpočet Jouleova tepla využíváme Jouleovo–Lenzova zákona (Jouleova zákona) [20].

$$Q_J = RI^2t \quad (5)$$



Kde  $R$  je odpor vodiče [ $\Omega$ ],  $I$  je procházející proud [A] a  $t$  je doba, po kterou proud prochází vodičem [s]. Tento zákon nám ukazuje, že ohmické teplo roste přímo úměrně s elektrickým odporem. Elektrický odpor vodiče můžeme vypočítat podle vztahu

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (6)$$

kde  $\rho$  je rezistivita materiálu [ $\Omega \cdot m$ ],  $l$  je délka vodiče [m] a  $S$  je jeho průřez [ $m^2$ ] [13]. Pokud není znám proud procházející vodičem, ale je známo napětí můžeme Joulov-Lenzův zákon za použití Ohmova zákona upravit [19].

$$Q_J = RI^2t = R \frac{U^2}{R^2} t = \frac{U^2}{R} t \quad (7)$$

Odporové ohřívání se rozděluje podle vzniku a využití tepla na přímý odporový ohřev a nepřímý odporový ohřev [21].

### 2.2.1 Přímý odporový ohřev

Již z názvu vyplývá, že teplo v zařízeních pro přímý odporový ohřev vzniká přímým průchodem elektrického proudu materiálem (vsázkou) nebo elektricky vodivou kapalinou [13]. Základní teorie přímého elektrického ohřevu jsou dány Joulovým zákonem, který je uveden výše [13] [21]. Při projektování zařízení pro přímý odporový ohřev je největším problémem nelineární závislost fyzikálních vlastností elektrolytu či vsázky na teplotě [13]. Potřebný elektrický výkon k ohřevu nepřímo úměrně závisí na časovém průběhu ohřevu a přímo úměrně na tepelné bilanci [13] [21].

$$P \approx \frac{dQ}{dt} \quad (8)$$

Tepelná (energetická) bilance je součet užitečného tepla potřebného k ohřevu vsázky (elektrolytu) a tepelných ztrát okolí vsázky (elektrolytu) [21]. Po zvětšení hodnoty potřebného elektrického výkonu o tepelné ztráty způsobené vsázcím zařízením, ochlazováním vsázky, ztráty příslušného transformátoru a o výkon potřebný pro pohon mechanismů dochází k získání hodnoty celkového odebíraného výkonu [13]. Zařízení pro přímý odporový ohřev můžeme dále rozdělit podle druhu vsázky a to na zařízení pro ohřev pevné vsázky, což jsou zařízení kovová (tyče), dráty, pásy, zařízení uhlíková a grafitová a na zařízení pro ohřev tekuté vsázky, to jsou voda, sklo, solná lázeň a elektrolyzéry [21].

## 2.2.2 Nepřímý odporový ohřev

Při nepřímém odporovém ohřevu dochází ke vzniku tepla v topných člancích na rozdíl od přímého elektrického ohřevu, kde ke vzniku tepla docházelo při průchodu elektrického proudu přímo vsázkou. Teplo se při nepřímém odporovém ohřevu dostává na povrch vsázky sáláním topných článků a prouděním vzduchu. Zařízení, které využívají nepřímého odporového ohřevu se nazývají odporové pece. Tyto pece se dají rozdělit do několika kategorií. Nejjednodušším a zároveň jedním z nejzákladnějších rozdělení je dělení podle teploty:

1. Pece do 600 °C (nízkoteplotní pece)
2. pece od 600 °C do 1100 °C (středoteplotní pece)
3. pece nad 1100 °C (vysokoteplotní pece).

Dále je můžeme dělit podle atmosféry uvnitř pece:

1. s normální atmosférou
2. s řízenou atmosférou
3. pracující s vakuem.

Nebo podle pohybu vsázky při ohřevu, a to na pece:

1. s nepohybující se vsázkou a přerušovaným provozem
1. se vsázkou procházející pecí a nepřerušovaným provozem. [13][21]

## 2.3 Elektrický ohřev obloukový

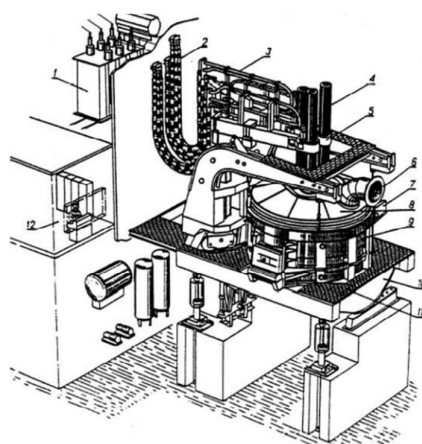
Obloukový ohřev je vyhřívací technika, při které je teplo primárně vyráběno jedním nebo více hořícími oblouky [7]. Pro pochopení poslouží příklad vzniku oblouku mezi elektrodami. Tyto elektrody jsou připojené na napětí, katoda je připojena na záporný pól zdroje a anoda na kladný. Při dotyku obou elektrod začne obvodem protékat proud a po následném oddálení elektrod a přerušení kontaktu začne mezi elektrodami vznikat vodivá cesta. V této části probíhá mezi elektrodami ionizace prostředí a vodivými prvky v tomto prostředí jsou ionizované páry materiálu obou elektrod a vzduchu. Zde vzniká elektrický oblouk. [7][13][21]. Teplo je přenášeno do ohřívaného materiálu hlavně sáláním a částečně kondukcí a konvekcí [7].

Ohřevem pomocí elektrického oblouku můžeme ohřívat materiály v pevném, kapalném i plynném skupenství. Při atmosférickém tlaku může teplota oblouku být až v řádech tisíců

stupňů Celsia. Obloukové vytápění může být velice výkonné a používá se například pro tavení materiálů. [22]

Obloukový ohřev probíhá v takzvaných obloukových pecích, které můžeme podle hoření oblouku a přenosu tepla na vsázkou rozdělit na pece s přímým obloukem, pece s nepřímým obloukem a pece se zakrytým obloukem. V pecích s přímým obloukem, hoří oblouk mezi elektrodou a vsázkou, občas můžeme tyto pece najít pod názvem pece se závislým obloukem. Nejvíce jsou využívány při výrobě oceli a litin. V druhém druhu pecí, tedy v pecích s nepřímým obloukem hoří oblouk mezi dvěma elektrodami. Teplo je poté přenášeno do vsázky sáláním. Z tohoto důvodu se tyto pece také nazývají pece se sálavým obloukem. Oblouk, který hoří nezávisle na vsázce se nazývá nezávislý oblouk. Využití najdou při výrobě litiny, bronzu, mědi, feroslitin a karbidů. Ve třetím typu pecí, v pecích se zakrytým obloukem, hoří oblouk mezi a elektrodami a zároveň mezi vsázkou. Elektrody jsou v tomto druhu pece ponořeny do roztavené strusky a okolo nich jsou příměsi a rudy, celý oblouk je tedy zakrytý. [13][21][23]

Obloukové pece mají buďto uhlíkové, grafitové, anebo násypné elektrody. Právě elektrody jsou jednou z nejdůležitějších částí pecí a zároveň část, která velice ovlivňuje provozní náklady [21].



- 1 — pecní transformátor,
- 2 — ohebná část krátké cesty (kabely chlazené vodou),
- 3 — pevná část krátké cesty,
- 4 — elektrody,
- 5 — uchycení elektrod,
- 6 — odsávač plynu a prachu,
- 7 — odpichový žlab,
- 8 — víko pece,
- 9 — kotel (vana) pece,
- 10 — kolébka,
- 11 — plošina,
- 12 — řídicí stanoviště

Obr. 2 Oblouková pec (převzato z [21])

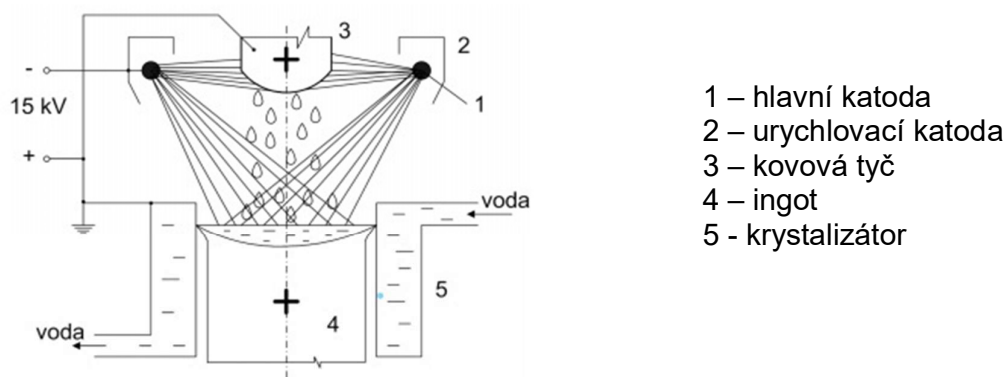
## 2.4 Elektronový ohřev

Při elektronovém ohřevu se využívá vlastností elektricky nabitých částic, respektive elektronů a jejich snadného uvolnění z obalu atomového jádra [13]. Jako v předešlých vyhřívacích zařízeních i v elektronových zařízeních nalezneme materiál (vsázkou), na tento

materiál dopadají urychlené elektrony a dochází k odevzdání části jejich kinetické energie a přeměně elektrické energie na teplo [13][21].

Svazek elektronů dopadající na vsázku se nazývá elektronový paprsek a je vytvářený v elektronovém generátoru, který je také nazývaný elektronové dělo, tato část je základem každého elektronového zařízení. K vytvoření elektronového děla je potřeba termoemisní zdroj, například katoda žhavená průchodem elektrického proudu [13]. Elektronová děla se od sebe liší hlavně tvarem a uspořádáním elektrodového systému. Elektronové zařízení používají elektronová děla s axiálním systémem, s příčným elektronovým paprskem a se systémem prstencové katody, ty se dále dělí na blízké a vzdálené. [13][24] Nejvyužívanější elektronové dělo je dělo s axiálním systémem, zároveň je také nejvýkonnější, může dosahovat výkonu až 1,2 MW. Tento druh elektronových děl není ale nejúčinnější. Z pohledu účinnosti jsou nejlepší elektronová děla s prstencovou katodou a to proto, že v těchto zařízeních je anodou přímo vsázka. [13]

Elektronová zařízení nacházejí největší využití v hutnickém průmyslu, konkrétně jsou využívána například k tavení kovů, k přetavování monokrystalů nebo jsou používána pro opracování tvrdých a těžko zpracovatelných kovů [21].



Obr. 3 Elektronové dělo se systémem blízké prstencové katody (převzato z [13])

## 2.5 Ohřev pomocí infrazářičů

Ohřev pomocí infrazářičů využívá infračerveného záření, což je pro člověka neviditelné elektromagnetické záření, které se šíří přímočaře prostřednictvím kulové vlny. Vlnové délky, kterých je využíváno jsou dobře emitovány a leží v optickém pásmu neboli v části

elektromagnetického spektra, kde se uplatňují zákony geometrické optiky. [13][21][24]  
Proto zde platí následující vztah:

$$c = \lambda \cdot f \quad (9)$$

kde je  $c$  rychlost světla (ve vakuu je rychlost světla 299 792 458 m/s),  $\lambda$  je vlnová délka [m] a  $f$  je frekvence zářiče [ $s^{-1}$ ]. V praxi se využívají infračervené zářiče a sálavé panely s vlnovými délkami od 1 do 10  $\mu\text{m}$ . [13][24]

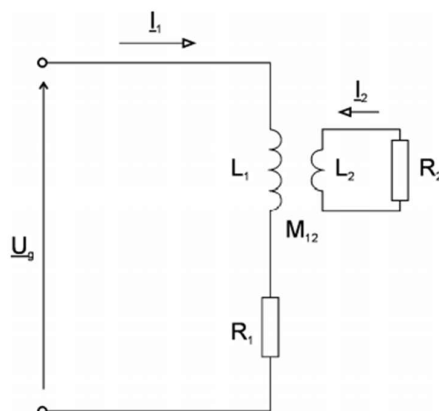
Podle vlnové délky se volí použití tepelného zářiče, ovlivní se tak hospodárnost, efektivita a zároveň i provozní náklady. Základní rozdělní infrazářičů je na krátkovlnné, středovlnné a dlouhovlnné.

První typ zářičů, tedy IR-A krátkovlnné infračervené zářiče pracují při velmi vysokých teplotách a s vlnovou délkou od 0,8 do 1,4  $\mu\text{m}$ . Jsou většinou formované do trubkového tvaru. Jejich účinnosti se využívá hlavně při vytápění velkých hal, při zónovém vytápění pracovišť dále při vytápění teras, pergol nebo venkovních prostor. Druhým typem zářičů jsou IR-B středovlnné infračervené zářiče, ty pracují při nižších teplotách než první typ zářičů a zároveň jsou rozměrnější. Vlnová délka se zde pohybuje v rozmezí od 1,4 do 3  $\mu\text{m}$ . Využití najdou při celoplošném vytápění izolovaných objektů, koupelen, zimních zahrad nebo jsou používány k sušení a vytvrzování při technologických procesech. Posledním druhem jsou IR-C dlouhovlnné infračervené zářiče do této kategorie spadají i sálavé panely, v porovnání s předešlými typy pracují tyto zářiče s nejnižšími teplotami a vlnovou délkou 3 až 10  $\mu\text{m}$ . Tyto panely dosahují v porovnání s ostatními většími rozměry, ale poskytují vysokou živnost. Tento druh se využívá jako hlavní zdroj vytápění domů a bytů nebo například kanceláří. [25]

## 2.6 Indukční ohřev

Indukční ohřev je využíván pouze u elektricky vodivých materiálů, tyto materiály jsou vloženy do střídavého magnetického pole, v materiálu dojde k indukovaní proudů, tyto proudy jsou vytlačovány na povrch předmětu (skinefekt), siločáry jsou postupně více nahuštěné a vznikají vířivé proudy a zároveň se vyvíjí Joulovo teplo. [21][24] Při popisu

indukčního ohřevu se často používá přirovnání k transformátoru, kde výstupní vinutí je vsázka a je spojeno nakrátko [13][21].



Obr. 4 Náhradní elektrické schéma indukčního ohřevu (převzato z [13])

V náhradním schématu (obr. 4) je vlastní indukčnost cívky označena jako  $L_1$  [H], vlastní indukčnost vsázky je  $L_2$  [H], činný odpor cívky  $R_1$  [ $\Omega$ ], činný odpor vsázky  $R_2$  [ $\Omega$ ], dále je zde vzájemná indukčnost  $M_{12}$  [H], proud zdroje  $I_1$  [A], proud vsázkou  $I_2$  [A] a napětí zdroje  $U_g$  [V] [13]. Při indukčním ohřevu teplo vzniká přímo ve vsázce, která je zároveň nejteplejším objektem celé soustavy, tato vlastnost se považuje za největší výhodu indukčního ohřevu [24]. Množství vyvinutého tepla při indukčním ohřevu odpovídá následujícímu vztahu [21]:

$$Q \approx k \cdot \rho \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot t \quad (10)$$

Indukční ohřev se využívá hlavně v průmyslu. Jedno z využití je za pomoci kelímkové a kanálové indukční pece. Pomocí těchto pecí dochází k tavení kovů. Velkou výhodou těchto pecí je čistota, umožní připravení čistšího kovu než například oblouková pec, kde se může taveninu kontaminovat například materiál z elektrod. Dalším využitím indukčního ohřevu je tváření nebo kalení, kde při vhodném výběru induktoru, kmitočtu a doby ohřevu dojde k rovnoměrnému ohřátí (tváření) nebo dojde k prohřátí pouze povrchové vrstvy (kalení). Při výrobě trubek z pásů plechů se často využívá indukčního svařování. Dále se indukční ohřev používá v takzvaném indukčním pájení nebo v tavení ve vakuovém kelímku. Za zmínku stojí také indukční plazma, která se využívá v plazmové chemii a práškové metalurgii. Indukční ohřev, po ionizaci plynu vnějším zdrojem, udržuje plyn vodivý. Posledním velkým využitím, ale zároveň i nejznámějším je indukční vařič, který na rozdíl od odporového ohřevu, který je využíván v plotýnkových vařičích nebo sklokeramických varných deskách, ohřívá přímo dno kovové nádoby, teplo tedy neprochází ani izolantem a ani kovovou či sklokeramickou

deskou, jako je tomu u odporového ohřevu. Díky tomu při přechodu tepla dochází k minimálním ztrátám a vysoké účinnosti. [21][24]

## 2.7 Dielektrický ohřev

Princip dielektrických zařízení se velmi podobá indukčním zařízením, uplatňuje se u nich elektrická složka vlnění a k ohřevu se využívá kondenzátor, u zařízení indukčních se uplatňuje složka magnetická a k ohřevu se využívá cívka. Na rozdíl od indukčních zařízení, dielektrická zařízení slouží k ohřevu nevodivých materiálů [13][21].

Při dielektrickém ohřevu se nevodivá látka vloží mezi elektrody kondenzátoru a elektrody se připojí k napětí, tím se vytvoří elektrické pole a dochází k následné polarizaci dielektrika (nevodivé látky, izolanty). Molekuly nevodivé látky se začnou chovat jako elektrické dipóly a jejich natačení bude záviset na jejich polaritě. Při tomto natačení dochází ke vzniku tepla způsobeného třením. Vlastnost materiálu a vzdálenost elektrod ovlivňuje množství tepla, které bude vyrobeno. Zároveň má na množství tepla vliv velikost napětí a kmitočtu. [13][21][24]

Využití nachází dielektrický ohřev v dřevařském průmyslu, při ohřevu plastických hmot (tvarování) a při svařování plastů [21].

### 2.7.1 Mikrovlnný ohřev

Mikrovlnný ohřev je speciální druh dielektrického ohřevu. Zatímco při normálním dielektrickém ohřevu jsou používány kmitočty do přibližně 300 MHz u mikrovlnného ohřevu jsou použité kmitočty něco okolo jednotek GHz a místo kondenzátoru se v systému nachází jako pracovní prostor tak zvaný multimódový rezonátor, což je dokonale uzavřený prostor, který má stěny z dobře vodivého materiálu, například z hliníkového plechu. Mikrovlnné zařízení má tři hlavní části a to zdroj mikrovlnného záření, například vakuová elektronka (magnetron), přenosovou část (vlnovod), kterou jsou směřovány mikrovlny vyzářené ze zdroje pomocí antény do třetí části, což je pracovní prostor. V tomto prostoru dochází ke vzniku stojatého elektromagnetického vlnění. Vsázka se otáčí nebo je využité otáčející se kovové křídélko (které míchá stojatým vlněním), aby došlo k rovnoměrnému ohřevu. [13][26]

## 2.8 Plazmový ohřev

V plazmovém ohřevu je využíváno nízkoteplotního plazmatu, ten má teplotu v rozmezí od 10 000 do 14 000 °C. Tento plazmat je vytvořen v plazmovém hořáku, který využívá

elektrického oblouku koncentrovaného tryskou s aerodynamickým spoluúčinkem plazmotvorného plynu a formováním sloupce plazmatu induktorem. Využití nachází plazmový ohřev ve svařování a řezání kovů, dále také ve stříkání vysoce tavitelných materiálů a v plazmové metalurgii. [21][24] Hořáky se dají rozdělit na hořák s nezávislým obloukem a hořák se závislým obloukem [27].

## 2.9 Ohřev pomocí laserů

Ohřev pomocí laserů je používán k ohřevu povrchu materiálu, na který dopadají laserové paprsky a pomocí absorpce se energie z laserových paprsků mění v teplo [21]. Při ohřevu kovových materiálů je paprsek propouštěn pouze od 0,01  $\mu\text{m}$  do 0,1  $\mu\text{m}$ . Povrch materiálu je zahříván poměrně rychle a na vysokou teplotu, vytvoří se tedy teplotní gradient a pomocí vedení se pak teplo dostává i do zbytku materiálu [27]. Tohoto typu vyhřívání se využívá v lékařství, ve vojenské technice, při svařování, vrtání, opracovávání, řezání nebo při přetavování povrchových vrstev [24].



### 3 Aerosol Jet

Technologie Aerosol Jet printing, známá také pod zkratkou AJP, je zařazována mezi depoziční, selektivní a aditivní technologie [28][29]. Technologie AJP umožňuje tisk elektroniky a vodivých cest na 2D i 3D substráty [28]. K návrhu tištěných elementů a elektrických obvodů se využívá CAD systémů [29]. Na rozdíl od konvenčních technologií umožňujících tisk součástek, technologie AJP nepotřebuje žádné masky, šablony, není potřeba pokovování ani leptání, celý tisk probíhá bezkontaktně. Velkou výhodou je možnost tisku čar v šířce již od 10  $\mu\text{m}$  a minimální tloušťka tisku začíná už na 100 nm. Důležitou vlastností je také možnost tisku na téměř jakýkoliv povrch a oproti konvenčním technologiím je velice jednoduchá změna tisknutého motivu. Samozřejmě má tato technologie i své nevýhody. Tisk je velice drahý a to z důvodu vysoké ceny používaných inkoustů a bohužel zatím tato technologie není přizpůsobena průmyslové výrobě popřípadě tisku na velké substráty. [28][30]

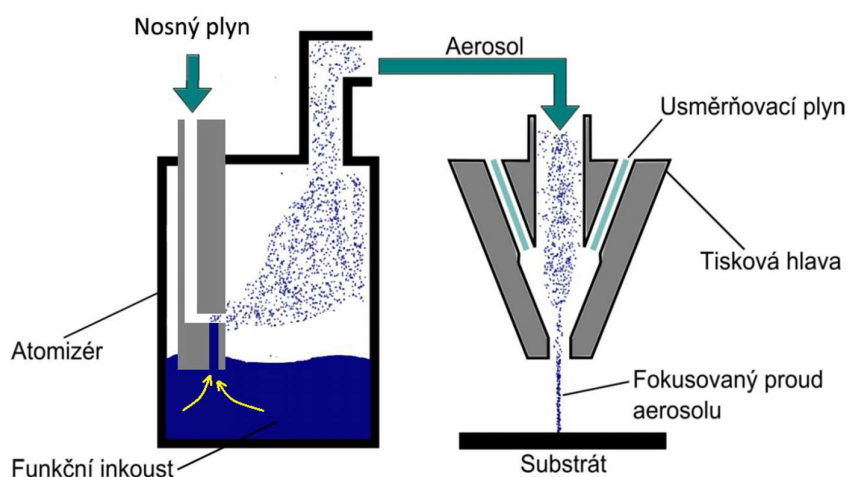
#### 3.1 Historie

První zmínka o tištěné elektronice a první pokusy pochází již z 20. století. V té době se používaly plotry, které tiskly návrhy elektrických obvodů například na skleněné substráty. Technologie Aerosol Jet má kratší historii a její počátky jsou v devadesátých letech 20. století. Její vyvinutí si přála agentura DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, v překladu Agentura ministerstva obrany pro pokročilé výzkumné projekty), která měla požadavek na získání technologie, která by dokázala za pomoci CAD systémů rychlou výrobu elektroniky. Zároveň bylo potřeba, aby tato technologie doplnila technologii inkjet a sítotisk, nebylo v plánu, aby těmto technologiím zcela konkurovala. Tento projekt skončil úspěchem a vznikla firma Optomec, která má sídlo ve Spojených státech amerických. Důležité je zmínit, že tato firma vlastní patent a tedy i veškerá práva na používání této technologie, veškeré stroje využívající technologii tisku jsou tedy vyrobeny firmou Optomec. [28][31][30]

#### 3.2 Princip Aerosol Jet technologie

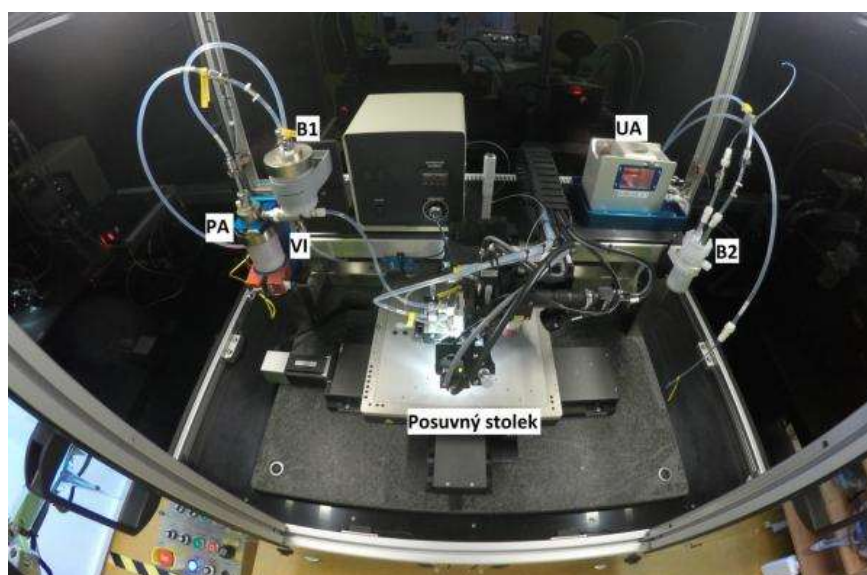
Z názvu technologie se ihned dá usoudit, že AJP je technologie při které je materiál nanášen pomocí aerosolu, což je směs malých kapalných částic v plynu. Zároveň využívá aerodynamického proudu procesního plynu (technický dusík), díky kterému je možné nanášení na přesně definovanou plochu. [28][32] K pochopení principu Aerosol Jet technologie je dobré rozdělení systému na dvě základní části a to na atomizér, do něho je

přiváděn nosný plyn (dusík), který prochází tryškou v atomizéru, díky Venturiho efektu přisává inkoust z nádoby a proudem nosného plynu ho rozprašuje na aerosolové částice, které jsou unášeny dále do systému. Kapky inkoustu, které jsou příliš velké padají zpět do zásobní nádoby. Kapky, které pokračují dále do systému mají rozměr mezi 1 – 5  $\mu\text{m}$ . Jednodušeji jde tedy říci, že zde dochází k vytvoření aerosolu a druhou částí je tisková hlava, do které se aerosol dostane za pomoci nosného plynu. V tiskové hlavě potom dojde k zaostření proudu aerosolu za pomoci usměrňovacího plynu a následnému nanesení aerosolu na substrát. [33][30][28] Schéma těchto dvou částí je na obrázku 5.



Obr. 5 Jednoduché schéma atomizéru a tiskové hlavy (převzato z [33])

Jak je již zmíněno výše, jako první v procesu probíhá atomizace. Při tisknutí si může uživatel vybrat ze dvou druhů možných atomizací, ale vždy pouze jednu z nich, nikoliv obě. [29]



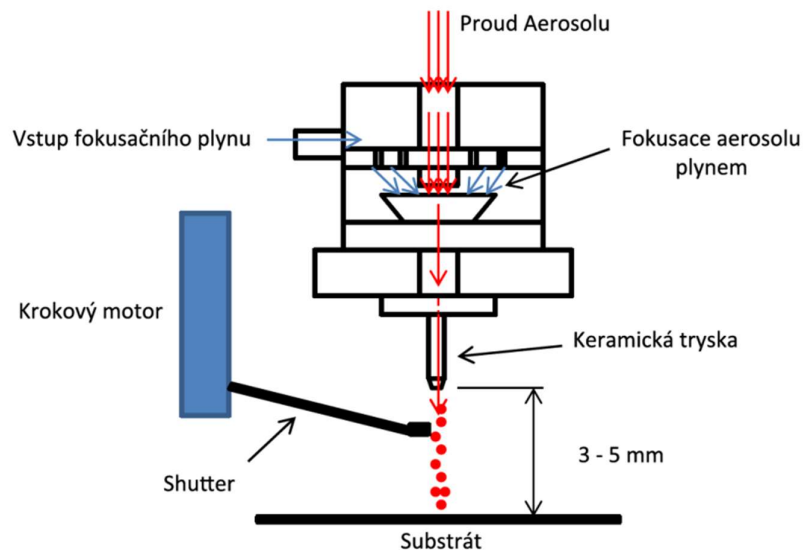
Obr. 6 Tiskárna pro Aerosol Jet Printing (převzato z [29])

Atomizace zmíněna výše je takzvaná pneumatická atomizace (PA – obr. 6). Při této atomizaci musí být v nádobce minimálně 15 ml inkoustu a používá se při tisku čar o šířce 25  $\mu\text{m}$  a silnějších a je možné použití inkoustů s vyšší viskozitou ( $1 - 1000 \text{ [mPa} \cdot \text{s]}$ ) ([30])

Druhým druhem atomizace je ultrazvuková atomizace (UA – obr. 6). Tento druh atomizace je nazýván ultrazvukový, protože aerosol je vytvářen pomocí ultrazvukových vln. Inkoust je opět umístěn v perfluoropolymerové nádobce, ale tahle nádobka je ponořená ve vodě. Piezoelektrický převodník, který má frekvenci vyšší než 20 kHz, vytvoří ultrazvukové vlny, které rozkmitají vodu a ta způsobí vibrace nádoby ve které je umístěný inkoust. Dochází k porušení povrchového napětí inkoustu a uvolňování kapiček inkoustu. Tyto kapičky jsou poté pomocí dusíku opět dopraveny do tiskové hlavy. Tento druh může být používán pouze při použití inkoustů s nižší viskozitou ( $1 - 5 \text{ [mPa} \cdot \text{s]}$ ). Výhodou může být fakt, že při ultrazvukové atomizaci se může do nádoby dát pouze malé množství inkoustu (1 ml). Tento typ atomizace je vhodný, když je potřeba tisknout motivy s velmi vysokým rozlišením či nanášet velmi tenké vrstvy. [29][30]

Na obrázku 6 je možné si všimnout poblíž atomizérů takzvaných bubblerů (B1 a B2), tuhle část systému můžeme a nemusíme při atomizaci použít [30]. Jelikož na inkoust dopadá nepřetržitý tok dusíku, popřípadě stlačeného vzduchu dochází k odpařování rozpouštědla z atomizéru, a následné kontinuální změně parametrů inkoustu a ovlivnění kvality tisku. A právě bubbler je zde proto, aby toto odpařování snížil na minimum a to tím, že procesní plyn prochází skrz tento probublávající systém, ve kterém se nachází obvykle stejné rozpouštědlo, které je využité pro inkoust, může to být voda, alkohol nebo třeba aceton. Pomocí plynu se částice tohoto rozpouštědla přenesou do inkoustu a doplní rozpouštědlo snížené atomizačním procesem. [34]

Ať je zvolena pneumatická nebo ultrazvuková atomizace, tak další část systému je již stejná. Dochází k přenosu aerosolu pomocí dusíku do tiskové hlavy. Zde dochází k nanášení aerosolu na substrát, tuto část rozdělujeme na trysku a shutter. Aerosol je v tiskové hlavě usměrňován dusíkem, aby došlo nanesení správné šířky motivu. Podle toho jaké je požadované rozlišení a velikost motivu se vybírá správný tvar a velikost trysky. Trysky jsou vyrobeny z keramiky nebo oceli a odstup trysky od substrátů bývá 3 - 5 mm. Stavítko (shutter) se v systému nachází, aby v případě tisku nespojitých motivů zastavilo depozici materiálu na substrát. Nachází se pod tryskou, je vyrobeno z kovu a má tvar lžičky. Stavítko může být pro některé konfigurace i odsávané do odpadní nádoby. [29][30]



Obr.7 Schéma tiskové hlavy (převzato z [35])

### 3.3 Materiály

Tato kapitola se věnuje inkoustům používaných při tisku, jejich rozdělení a substrátům, na který jsou nanášeny motivy. Vhodným zvolením inkoustu a substrátu se může velice zvýšit kvalita tisknutého výrobku.

#### 3.3.1 Substráty

Jak již bylo řečeno, technologie Aerosol Jet dokáže tisknout víceméně na všechny druhy substrátu. Tato technologie dovede nanášet inkoust i na nerovné povrchy, 3D povrchy či povrchy s vysokou drsností. Jedinou omezující podmínkou je velikost a hmotnost substrátu pro manipulační posuvný stolek v zařízení.

#### 3.3.2 Inkousty

Mezi inkousty, které lze použít pro technologii AJP, panuje velká rozmanitost. Uživatel se tedy musí rozhodnout dle aplikace jaký inkoust pro něj bude pro daný tisk nejvhodnější. Jakou viskozitu by měl mít, jakou by měl mít vodivost, jak dlouho bude trvat vytvrzení a při jaké teplotě apod. Inkousty používané technologií Aerosol Jet se můžeme rozlišovat podle mnoha vlastností. Výběr inkoustu závisí i na požadovaném druhu atomizace či naopak. [30][35]

Tab. 2 Porovnání vlastností inkoustů pro pneumatickou a ultrazvukovou atomizaci. [35]

Vlastnost	Pneumatická atomizace	Ultrazvuková atomizace
Velikost částic [nm]	< 300	< 50
Viskozita [cP]	1 - 1000	1 - 5

Samozřejmě se používá i různé dělení inkoustů. Hlavním způsobem dělení je dělení inkoustů podle materiálových příměsí, toto dělení je používáné i firmou Optomec [36].

### **Vodivé kovové inkousty**

Jedná se o nejvyužívanější inkousty při tisku elektronických součástek. Při výrobě těchto inkoustů se využívají nanočástice z vodivých, kovových látek tedy zlata, stříbra, platiny, paladia, mědi, hliníku, niklu apod. Tyto inkousty se používají například při tisku vodivých čar, spojování součástek, vyhřívání aj. [36][37]

### **Vodivé nekovové inkousty**

Z nekovových inkoustů jsou využívány hlavně uhlíkové nanotrubičky a to uhlíkové nanotrubičky s jednou stěnou (SWCNTs), víceúrovňové uhlíkové nanotrubičky (MWCNTs) a dále vodivý polymer ze dvou ionomerů (PEDOT:PSS). [36]

### **Polovodičové inkousty**

Při výrobě těchto inkoustů se jako při výrobě nekovových inkoustů používají uhlíkové nanotrubičky. Ovšem v tomto druhu inkoustů jsou to pouze uhlíkové nanotrubičky s jednou stěnou (SWCNTs). [36]

### **Dielektrické a adhezivní inkousty**

Většina obvodů má své nevodivé části, pro jejich tisk se volí dielektrické a adhezivní inkousty. Další jejich využití může být lepidlo. Vyráběny jsou z polyimidů, teflonu AF, UV adheziva nebo třeba fotorezistu SU-8. [36]

### **Odporové inkousty**

Při tisku odporových cest, popřípadě při nanášení rezistorů pomocí tisku volíme odporové inkousty. Tyto inkousty jsou vyrobeny nejčastěji z uhlíku a ruthenia. [36]

### Další inkousty

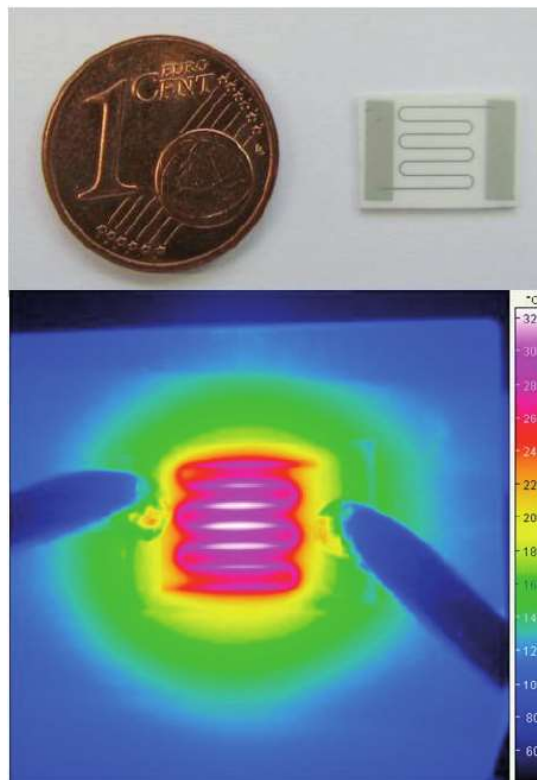
V této kategorii se nacházejí inkousty, které v sobě nesou například biomateriály jako DNA či proteiny. Lze také najít inkousty, které se využívají jako rozpouštědla, kyseliny, zásady, foto (leptu) vzdorné materiály, popřípadě magnetické inkousty a další. [36]

### 3.4 Příklad využití

Aerosol Jet technologie má mnoho využití. Tištěnou elektroniku můžeme v dnešní době najít ve spoustě aplikacích a její využití stále roste. Příkladem mohou být tištěné antény, které jsou k nalezení například v mobilních telefonech. Za zmínění také stojí tisk pasivních komponentů (R, L, C), senzorů a tranzistorů. [30]

#### 3.4.1 Tištěné vyhřívací elementy

Jedno z využití je také při výrobě tištěných vyhřívacích elementů. Tato tělesa se používají například pro ohřev tekutin nebo ohřev rovinných ploch. Jejich výhodou je určitě rychlý náběh teploty a zároveň s tím spojena i úspora energie. Za další výhodu se dá považovat možnost vysokého povrchového zatížení, mohou to být až desítky  $W/cm^2$ . [38] [39] [40]



Obr. 8 Ukázka malého platinového ohříváče vyrobeného pomocí technologie AJP, obrázek z infračervené kamery (převzato z [38])

### 3.5 Příklad návrhu tištěné vyhřívací struktury

V této kapitole je uveden příklad návrhu a tisku odporového vyhřívacího elementu. Který byl navržen pro použití ve vesmíru a natisknutý technologií Aerosol Jet a dávkováním (dispensingem) na substrát o velikosti 100 × 100 mm.

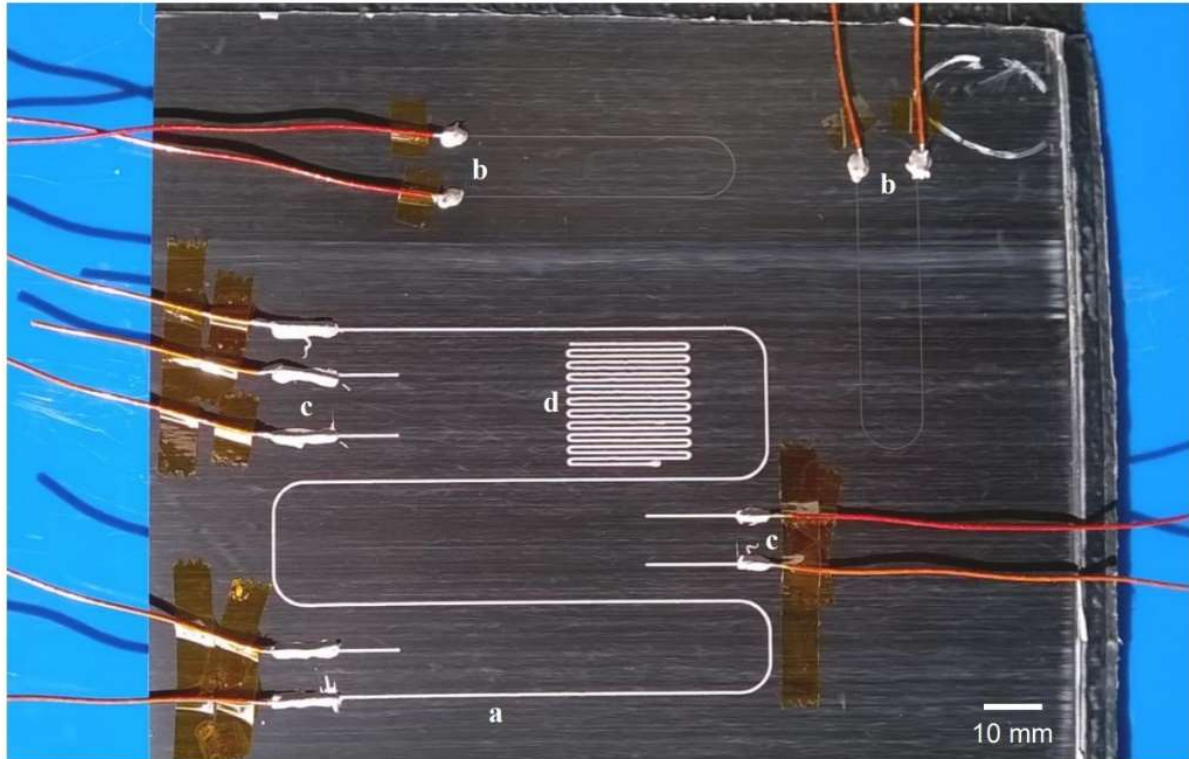
Vyhřívací elementy používané ve vesmíru musejí splňovat spoustu parametrů jako je bezpečnosti, nízká hmotnost, dlouhá životnost, odolnost vůči vnějšímu prostředí a zároveň musí být mnohokrát aplikovány na nerovných místech, proto zde byla zvolena technologie Aerosol Jet, která umožňuje tisk vyhřívací struktury na 3D objekty. [38]

#### 3.5.1 Základní příprava a použité materiály

Nejdříve byli vybrány dva elektricky vodivé materiály. Těmi se nanosly topné dráhy na substrát. Pro technologii Aerosol Jet byl vybrán nízko viskózní nanočásticový inkoust na bázi stříbra (Silverjet DGP-45LT-15C). Tento inkoust obsahuje sférické částice stříbra v triethylenglykolmonoethyletheru a další nezveřejněné přísady. Po vysušení a spékání se rozpouštědlo odpaří a mikrostruktura konečného materiálu je velmi podobná kovovým materiálům. Druhým materiálem, který byl použit při dispensingu byla stříbro-epoxidová pasta (1901-SB). Tato pasta obsahuje stříbrné vločky a její matrice je založena na epoxidové pryskyřici a butyl diglykolacetátu. Po vysušení a vytvrzení se finální materiál skládá z 3D kovové sítě a sítě polymerní matrice. [38]

#### 3.5.2 Tisk a výroba

Jak již bylo zmíněno výše tepelné dráhy byly nanoseny pomocí technologie Aerosol Jet printing a dispensingu. Tyto dráhy mají různou velikost a topologii. Délky těchto drah jsou od 80 až do 400 mm. AJP vzorky byly připraveny pomocí trysky s průměrem 150 μm. Rychlost tisku byla nastavena na 1-2 mm/s a výsledná šířka a výška čáry je 115 μm, respektive 3 μm. Vytvrzování bylo provedeno při 150 °C po dobu 30 min. Ag pasta byla aplikována pomocí jehly s rotačním mikro ventilem za použití piezoelektrické, bezkontaktní technologie, dispensingu. Vnitřní průměr jehly byl 100 μm a dávkovací rychlost byla nastavena na 0,6 mm / s. Šířka a výška čar byla 435 μm a 16,5 μm, popřípadě 1215 μm a 65 μm. Při testování byly vytištěné dráhy kontaktovány postříbřeným měděným drátem. [38]

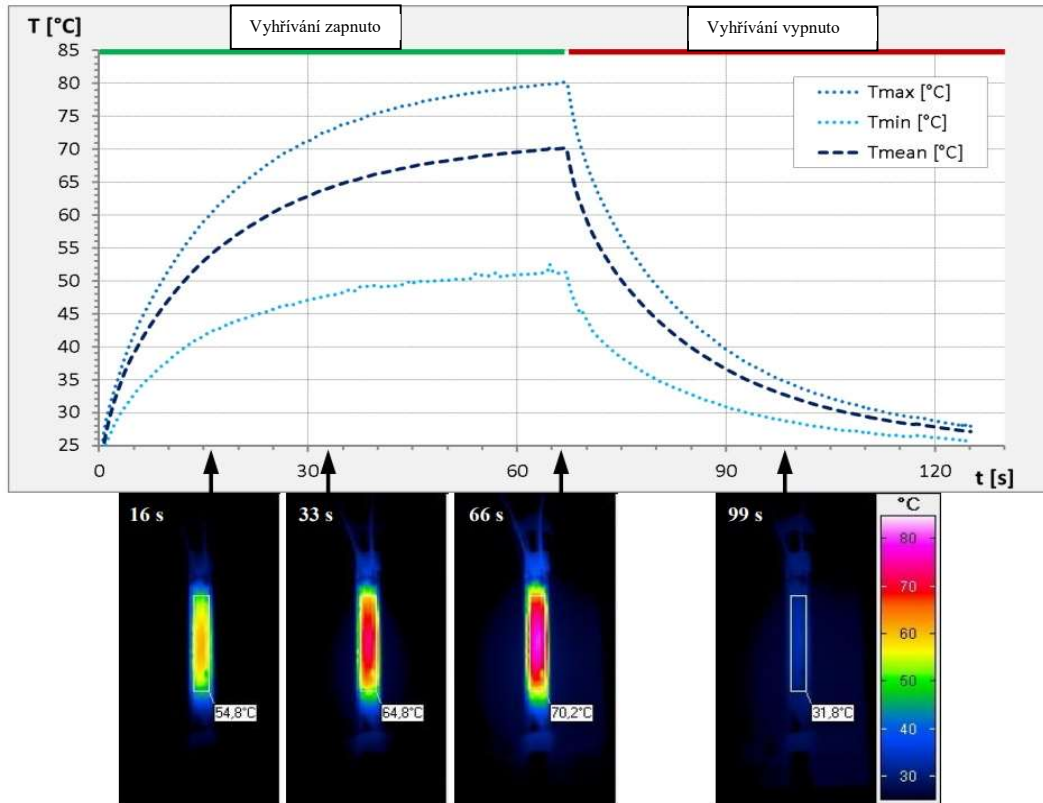


Obr. 9 a) vyhřívací element aplikovaný dispensingem, b) vyhřívací element aplikovaný technologií Aerosol Jet, c), d) části pro test konstrukce a zkoušku příčným řezem (převzato z [38])

### 3.5.3 Tepelná výkonost a zhodnocení

Tepelný test vzorku byl proveden při pokojové teplotě a na vzduchu. Obvody procházel stejnosměrný proud do velikosti několika ampérů a zdroj napětí dodával napětí do 100 V. Výsledné teploty byly zdokumentovány termografickou kamerou (Obrázek 10). Tištěné vyhřívací elementy vykazují téměř lineární chování. Ohřívací struktury z pasty odolávaly proudu o velikosti několika ampér, struktury z inkoustu pouze proudu o velikosti menším než 1 A. Při nízkém napětí, respektive proudu byl pozorován pouze nízký nárůst teploty, při vyšších proudech (napětí) bylo narůstání teploty úměrné a rychlejší. Po 1-2 minutách bylo dosaženo téměř teplotní rovnováhy. Při 50 V byl naměřen výkon asi 120 W. Po vypnutí napájení bylo po jedné minutě pozorováno snížení teploty téměř na pokojovou teplotu. [38]





Obr. 10 Tepelná výkonost (pokožová teplota, vzduch) elementu tisknutého technologií Aerosol Jet (převzato a upraveno z [38])

Koncept tištěných vyhřívací struktur na povrch kosmických raket může v budoucnu nahradit běžně používané řešení ohřívacích fólií a bude tak možnost vyhnout se některým omezením. Mimo to lze tištěné struktury použít na nevodivé podklady, což zlepšuje schopnost uzemnění zařízení a může nahradit aktuálně používanou zemnicí lištu. Podobným principem by se také daly tisknout i teplotní senzory. [38]

## 4 Příklady materiálů využívaných pro elektrotepelná zařízení

Provoz elektrotepelných zařízení může být náročný a kromě běžných konstrukčních materiálů jsou potřeba také materiály s vlastnostmi, které vyhovují práci při vysokých teplotách, práci v magnetickém poli nebo například v chemicky agresivním prostředí. Protože požadavky na tyto materiály jsou vysoké a spousta z nich si je protichůdná, tak volba materiálů je v mnoha případech velmi složitá. [27]

Konstrukční materiály elektrotepelných zařízení lze rozdělit podle dvou hlavních kritérií. První je rozdělení z chemicko-fyzikálního hlediska. Toto rozdělení rozděluje materiály jednoduše na materiály kovové a nekovové. Druhé rozdělení je z pohledu funkčnosti. Materiály se rozdělují na materiály pro vymezení a izolování pracovní komory pece, včetně různých pomocných prvků a na materiály pro výrobu prvků jednotlivých typů ohřevů, tedy topné články pro odporové pece, elektrody pro obloukové pece apod. [13][27]

Konstrukční materiály se posuzují podle několika kritérií. Prvním kritériem jsou jejich tepelné vlastnosti, tedy tepelná vodivost, teplota tavení, měrná tepelná kapacita, tepelná roztažnost, odolnost proti náhlým změnám teploty a žárovzdornost. Druhým kritériem jsou jejich mechanické vlastnosti, to znamená jejich pevnost, obrobitelnost, nasákavost a další. Dále jsou posuzovány chemické vlastnosti, elektrické vlastnosti (měrný odpor, permeabilita, permitivita, odolnost proti elektrickému oblouku atd.) a samozřejmě mezi těmito kritérii nechybí cena a dostupnost materiálu. [27] [41]

### 4.1 Kovové konstrukční materiály

Tyto materiály ve většině případů slouží jako obvodové konstrukce, ale zároveň jsou k nalezení i ve speciálních zařízeních i jako části dopravních mechanismů, v pracovním prostoru pece nebo třeba drážky topných článků. Tyto materiály jsou pod velkou mechanickou námahou nebo se vystavují vysokým teplotám a jsou proto vyrobeny ze speciálních žárovzdorných ocelí. Jejich vlastnosti se vylepšují přidáním dalších přísad do ocele, například chromu, niklu apod. Podle podílu těchto přísad se žárovzdorné ocele rozdělují na feritické a austenitické. [27]

### 4.2 Nekovové konstrukční materiály

Materiály patřící do této skupiny se nacházejí zejména ve vyzdívkách pecí, musí tedy mít dobrou mechanickou pevnost, odolnost proti změnám teploty a hlavně kvalitní tepelné

a elektrické vlastnosti. Mnohým z těchto požadavků vyhovují keramické materiály, které jsou podle použití rozděleny na žárovzdorné a teploizolační. [13][27] Mezi žárovzdorné keramické materiály patří materiály křemičité, kde je základní složkou oxid křemičitý, dále materiály hliníkokřemičité (směs oxidů  $Al_2O_3$  a  $SiO_2$ ), materiály vysokohlinité, který v sobě mají více než 45 %  $Al_2O_3$  a materiály magnezitové, kde je základní složkou oxid hořečnatý. [27]

### 4.3 Příklady materiálů pro výrobu elementů některých typů ohřevů

Tyto materiály zabezpečují přívod elektrické energie a zároveň její přeměnu na teplo. Jedná se o materiály kovové a nekovové a důležitým parametrem je hodnota pracovní teploty. Z těchto materiálů se vyrábí například indukctory pro indukční pece nebo elektrody pro sklářské tavící pece. [27] Více informací o těchto materiálech je v následujících podkapitolách u různých typů ohřevů.

#### 4.3.1 Nepřímý odporový ohřev

Nejdůležitější částí nepřímých odporových pecí jsou vyhřívací články. Kvalitní článek musí mít vysoký měrný odpor, malý teplotní součinitel odporu a dobrou časovou stálost odporu. Používají se zde tedy například články na bázi austenitických slitin (Cr + Ni + Fe), tedy nemagnetických, které velmi dobře odvádí teplo a feritických slitin (Cr + Al + Fe), které jsou magnetické a mají vyšší měrný odpor, ale mají nižší mechanickou pevnost. [27][41]

#### 4.3.2 Indukční ohřev

Indukční ohřev probíhá bez fyzického kontaktu mezi obrobkem a indukční cívkou. Proto se využívá v procesech, kde je důležitá čistota, například výroba polovodičů. Cívka je umístěna kolem obrobku (obráběného výrobku), teplo je produkováno pouze indukovaným proudem přenášeným obrobkem. Materiály, které se používají k výrobě těchto obrobků jsou kovy jako měď, hliník, ocel nebo mosaz, dále to mohou být třeba polovodiče jako je grafit, uhlík nebo karbid křemíku. [42]

#### 4.3.3 Ohřev pomocí infrazářičů

Infrazářiče mají uvnitř umístěnou ve většině případech trubici, jejíž složení ovlivňuje vlastnosti infrazářiče. Základními typy zářičů jsou karbonové, quartzové, halogenové a keramické. [43]

V karbonovém zářiči obsahuje trubice speciální vlákno (vlákno, které má vysokou vodivost a tím pádem dokáže přeměnit více energie na teplo, jeho účinnost je až 99%,

zároveň má vlákno i zlepšenou mechanickou odolnost a potlačuje jeho svítivost a je ve většině případů vyrobeno z chromu a niklu [43][44]), má tvar spirály a je omotané okolo keramického jádra, které je usazeno ve skleněné trubici. Karbonové zářiče mohou dosahovat teploty až 600 °C a úhel jeho sálání je přibližně 100°. Jak je zmíněno výše tento druh zářičů potlačuje svítivost, jsou tedy méně nebezpečné pro oči a jejich využití na místech, kde dochází k blízkému kontaktu s lidmi je opravdu velké. Je možné je najít v interiérech i exteriérech jako jsou, koupelny, sauny, garáže, terasy, zimní zahrady, restaurace apod. [43][45]

Je možné se také setkat s quartzovými infrazářiči, které mají zabudovanou quartzovou trubici s wolframovým vláknem. Nejčastějším typem zářičů jsou ale halogenové zářiče, ty mají uvnitř křemíkovou trubici a tato trubice dosahuje teploty od 600 do 1000 °C , což je přibližně 2x nižší teplota, než které dosahují quartzové infrazářiče (2 200°C). Důležité je ale zmínit, že ač halogenové zářiče dosahují nižších teplot, tak dokáží vyhřívát mnohem větší plochy, důvodem jsou jejich odrazivé zrcadla.

Hojně jsou také využívány například keramické infrazářiče, jejich topnou trubici tvoří odporový element z chromniklové slitiny a ta je uložena v keramickém obalu. Dále existují i speciální zářiče bez topné trubice jako např. kovové infrazářiče (hliníkové). Ty mají topné těleso, které je vyrobeno chromniklové oceli a zářič je vyroben z masivního hliníkového profilu. [43] [44] [45]



Obr. 11 Quartzový zářič (převzato z [43])

## 5 Aplikace elektrických vyhřívacích struktur

Aplikace elektrických vyhřívacích struktur je velmi rozsáhlé téma a jejich využití je opravdu široké. Hojně je využíváné v průmyslu, v podobě pecí, například pecí odporových, obloukových, indukčních apod. Můžeme se setkat s elektrickým vytápěním budov, kde je oblíbené například odporové vytápění podlah nebo je možné nalézt infrazářiče na terase nebo v zimní zahradě či sauně. Další samostatnou kapitolou je elektrické vyhřívání v oblasti smart textilií či senzorů. Jak již bylo zmíněno využití je opravdu rozsáhlé, proto je tato kapitola zaměřena na dvě vybrané oblasti využití, kterými jsou automobilový a letecký průmysl.

### 5.1 Automobilový průmysl

Pod pojmem konvekční vytápění automobilu si lze představit princip, kdy se kabina automobilu zahřeje odpadním teplem od motoru přes zahřátou chladicí kapalinu. Chladicí kapalina absorbuje teplo z motoru a zahřívá se, poté je vedena přes tepelný výměník, kde rozehřívá jeho lamely. Teplý vzduch pak ventilací vstupuje do auta. [46][47] Tento systém, ale není vždy nejvhodnější. Například v elektromobilech je tento princip nepoužitelný, protože elektrický motor negeneruje dostatečné množství odpadního tepla. Vozy jsou poháněny elektrickou energií z akumulátorů, musí se tedy použít lehký zdroj tepla, protože čím těžší je topné jádro, tím rychleji dojde k vybití akumulátoru. [48]. Ohřívát elektricky vzduch vstupující do kabiny je u elektromobilů značně neefektivní. Proto, jako v jiných oborech, i zde dochází k inovacím a obměnám. Nejen elektromobily, ale i některé moderní vozy se spalovacími motory jsou již tak efektivní, že odpadního tepla generují velmi málo a vytápění kabiny vozu tak může být velice zdlouhavé. V nových automobilech jsou například více k nalezení tištěné topné elementy, které vyhřívají samostatné objekty v kabině automobilu, například sedačky, volant, loketní opěrky atd. Více se také dbá na dosažení pocitového komfortu než na pouhé sledování teploty v kabině. [49]

#### 5.1.1 Vyhřívání sedaček

Vyhřívání sedaček byly patentovány již v roce 1988 [50]. Tento patent ale popisuje vyhřívání sedaček, který využívá odporového vyhřívání, respektive odporového drátu, který je uspořádán do smyček pod potahem sedačky. [50][48] Bohužel tento systém není úplně bezpečný a často docházelo i k popáleninám, například kvůli použití silného drátu, takže už není tak hojně používán [48].

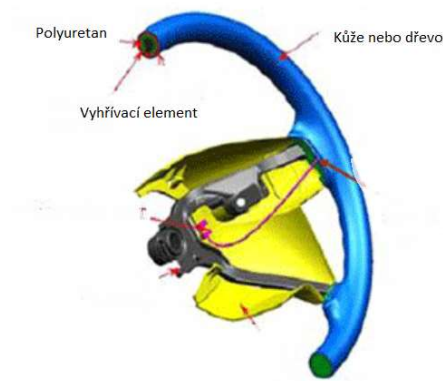
Novější vyhřívání sedaček využívá také odporového tepla, ale využívají se k tomu samoregulovatelné topné články, tyto články jsou bezpečné, pružné a roztahitelné. Tyto články mají danou maximální teplotu, kterou nemohou překročit. To, že jsou samoregulační znamená, že jsou schopné udržovat svou teplotu bez jakýchkoliv ovládacích prvků a jsou odolné proti vnějšímu rušení či poruchám. Samoregulovatelnost je založena na fyzikálním principu použití materiálu, který při vyšších teplotách vede hůře elektrický proud než při teplotách nízkých. Se stoupající teplotou tedy stoupá i odpor (snižuje se proud) a článek začne ztrácet svůj výkon. Po ochlazení se odpor opět sníží a proud zvýší, dochází opět k ohřátí na nejvyšší teplotu a cyklus se opakuje. [48] [51]



Obr. 12 Ukázky samoregulačních topných struktur (převzato z [51])

### 5.1.2 Vyhřívání volantu

Vyhřívání volantu je velmi podobné vyhřívání sedaček, také jsou zde použity samoregulovatelné články, které jsou instalovány přímo do volantu. Díky rychlému zahřívání má volant příjemnou teplotu dříve, než je řidič připraven k odjezdu. [48]



Obr. 13 Vyhřívání volantu (převzato a upraveno z [52])

### 5.1.3 Vyhřívání oken

Jedna z možností, jak vyhřívát okna aut, je vložení topných mikrodrátků, které jsou díky své velikosti pro lidské oko téměř neviditelné, do vrstveného skla. Drátky se při průchodu proudem ohřívají a díky šíření tepla kondukcí se zahřeje celé okno. [53]

Společnost Volkswagen začala v posledních letech využívat modernější technologii, kdy na jednu z ploch vrstveného čelního (nebo jakéhokoliv jiného) okna aplikují ultra tenkou, speciální vrstvu, která obsahuje kovové oxidy (většinou stříbra). Tato vrstva je tak tenká, že výrazně nezhoršuje optické parametry skla, průnik světla je tedy v podstatě neovlivněný, ale odráží infračervené sluneční paprsky tedy teplo, čehož je využito hlavně v letních měsících, kdy je pomocí této vrstvy zajištěno chladnější prostředí v kabině vozu (bylo prokázáno, že automobil, kde je tato vrstva aplikovaná na předním skle může mít teplotu v kabině až o 15°C nižší, než automobil bez této vrstvy [54][55]). I když má tato technologie své využití v létě, její hlavní využití je v chladnějším období. Díky elektrické vodivosti stříbrné vrstvy se při použití 12 V stejnosměrného napětí z vrstvy stává neviditelný topný prvek, který dokáže odmrazit nebo odmlžit přední sklo automobilu kdykoliv to je potřeba. [53][56][57]

### 5.1.4 Vyhřívání podlahy

Tištěné vyhřívací elementy mohou být v automobilu umístěny také do podlahových desek. Pocit tepla ve voze je ovlivněn nejen výslednou teplotou, ale i místy na které teplo aplikujeme (tj. pocitově může být větší zima v automobilu se vzduchem vyhřátým na 23°C než v automobilu se vzduchem vyhřátým na 21°C ale s podlahovým vytápěním, které nohy ohřívá na 25°C). Toto vyhřívání může nahradit konvenční vyhřívání pomocí teplotního výměníku. [38]

## 5.2 Letecký průmysl

V letectví je jedním z velkých problémů námraza. Prvním případem, kdy se řeší problém s námrazou na letadle je před vzletem letadla na letištích. Kvůli námraze může docházet ke zpožděním nebo rušení letů. Tento problém řeší většinou odmrazovací kapaliny, případně speciální kapaliny, které mají vyšší koncentraci glykolu a jejichž důležitou vlastností je velmi nízký bod tání (desítky stupňů pod 0°C). [58][59] Odmrazovací kapalina, která je nanášena na celé letadlo, zaručí odstranění ledu a sněhu, ale nezabrání dalšímu vzniku námrazy, proto se používá také druhá zmíněná kapalina s vyšší koncentrací glykolu, ta díky svému složení částečně zabraňuje i další tvorbě ledu. [59][60] Ačkoliv je tato metoda účinná, tak má i své nedostatky. Používání chemických kapalin není šetrné k životnímu prostředí a obzvláště, pokud se používá v tak hojném množství (na odmražení jednoho dopravního letadla je potřeba něco mezi 1 900 l až 3 800 l kapaliny [61]) a při tak časté aplikaci. Zároveň odmrazování za pomoci kapaliny trvá déle, než při použití jiných metod. Proto se využívají i jiné techniky, jednou z nich je odmrazování infračerveným zářením. [59][62]



Obr. 14 Nanášení rozmrazovací kapaliny na Boeing 747-200 (Jumbo Jet) nizozemských aerolinek KLM Royal Dutch Airlines (převzato z [63])

Rozmrazování pomocí infračerveného záření je využíváno na spousty letištích. Princip této metody je jednoduchý, dojde k rozmístění zářičů, které kopíruje tvar letadla a dochází k vyzařování infračerveného záření, přenosem tepla potom dochází k rozmrazení sněhu a ledu. Je tedy velice šetrná k životnímu prostředí a zároveň velmi rychlá. Při použití této metody je veškeré nastavení řízeno softwarově a jediné co je potřeba je tedy velký otevřený hangár, kde jsou panely instalovány tak, aby s nimi bylo možné hýbat. Bohužel se ale tato metoda nedá aplikovat bez hangáru, proto při sečtení výdajů za hangár(y) a infrazářiče, které



jsou pro tuto metodu potřeba, dojde ke zjištění, že je tato technika cenově velmi náročná. [64][62]



Obr. 15 Infračervené odmrazování (převzato z [64])

Dalším případem je tvorba námrazy za letu, kdy se musí řešit odmrazování křídel a jejich pohyblivých částí (spojlerů, klapek, křidélek atd.). To je u některých letadel řešeno pomocí horkovzdušných protinámrazových systémů. V těchto případech dodává tepelnou energii na křídla horký vzduch vycházející z nízkotlakého, popřípadě vysokotlakého kompresoru proudového motoru, popřípadě se pomocí výměníku získává ze spalin pístového motoru. Tento teplý vzduch je pomocí rozvodného systému dopravován do křídel a do prstenců motorů. Výhodou je, že vzduch je v této části stlačený, proto neztrácí teplo tak rychle. Velkou nevýhodou tohoto systému u proudových motorů ale je snižování jejich výkonů, protože vzduch je odebíráný z kompresoru motoru, jak je zmíněno výše. [60][65] Jednou z dalších metod, která se může použít pro odmrazování křídel za letu je využití grafitového topného článku. Na rozdíl od předešlých metod, není, díky vysoké vodivosti grafitových vláken, nutné použití vysokých napětí a lze použít pouze tenkou vrstvu grafitu, která je aplikovaná velmi blízko povrchu, který má být zahříván. [67] Výhodou grafitového článku je také možnost rychlého zahřátí a ochlazení. Princip spočívá v rozprostření těchto topných článků na místa, kde jsou potřeba a při sepnutí dochází k rychlému ohřátí a narušení ledu, který se prouděním vzduchu rozdělí a zmizí z povrchu letadla. Tento systém testovala pro malá letadla NASA a hmotnost celé soustavy je, i s vlastním alternátorem, pouze 20 kg. [66] [67]

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení s elektrickým ohřevem a technologií Aerosol Jet. Zároveň bylo úkolem seznámení s materiály, které jsou využívány při výrobě elektrických vyhřívacích elementů a popsání jejich aplikace. V první a druhé části této práce je popsáno obecně teplo a možnosti jeho přenosu, tedy přenos vedením, prouděním, vyzařováním a je poukázáno na analogii mezi polem teplotním a elektrickým. Dále je zde popsáno teplo elektrické a druhy elektrických ohřevů. Jak je v této práci uvedeno, elektrické ohřevy dělíme na elektrický ohřev odporový, elektrický ohřev obloukový, elektronový ohřev, ohřev pomocí infrazářičů, indukční ohřev, dielektrický ohřev, plazmový ohřev a ohřev pomocí laserů. Následující část se věnuje technologii Aerosol Jet, je zde zmíněna historie této technologie a její princip a jsou zde popsány hlavní části systému, tedy pneumatický a ultrazvukový atomizér, depoziční hlava, bubbler, tryska a shutter. Je zde také krátce zmíněné využití technologie. Na konci této části je příklad návrhu tištěné vyhřívací struktury vytvořené touto technologií, která je navržena pro užití ve vesmíru. Ve čtvrté části jsou popsány typy ohřevů z hlediska použitých materiálů a konstrukčních materiálů. V poslední části, páté části, jsou popsány vybrané aplikace elektrických vyhřívacích elementů v automobilovém průmyslu, kde se využívá hlavně odporový ohřev, a to při výrobě vytápěných sedaček, oken, volantů, loketních opěrek či podlah. Je zde zmíněna nemožnost zahřívání kabiny elektrických automobilů pomocí chladicí kapaliny a tepelného výměníku, protože elektrický motor negeneruje dostatečné množství odpadního tepla a ohřívání vzduchu vstupujícího do kabiny automobilů pomocí akumulátoru je velmi neefektivní. Proto musí být vyhřívání kabiny elektrického automobilu vyřešeno jinak, například tištěnými topnými elementy, díky kterým se může zvýšit efektivita i komfort v kabině automobilu. Další vybranou aplikací je letecký průmysl, kde se elektrickým ohřevem řeší problém se zamrznutím kapek vody na konstrukci letadla. A to za prvé v době kdy se letadlo nachází na letišti a kde se může využít odmrazování za pomoci infračervených zářičů, a za druhé odmrazování křídel letadel za letu, kde má slibnou budoucnost využití grafitových topných článků.

Elektrické vyhřívací elementy mají slibnou budoucnost, ať už v průmyslu nebo v každodenním životě. Například budoucnost v oblasti inteligentního bydlení (Smart Home), kde je celým základem kvalitní elektroinstalace, proto dává smysl využití elektrického ohřevu, například inteligentního podlahového vytápění a ochranných systémů s topnými kabely (vyhřívání potrubí proti zamrznutí apod.). Dalším odvětvím, kde mají

elektrické vyhřívací elementy možnost obrovského růstu je oblast smart textilií. Vyhřívané oblečení či inteligentní prostěradla mohou v budoucnosti ohřívát nejen sportovce či outdoorové nadšence, ale i pacienty na lůžku a poskytnout jim tak ideální tepelný komfort. Důležitou roli budou mít elektrické vyhřívací elementy také při cestách do vesmíru, ať již ve formě smart textilií jako součásti oblečení astronautů, systému udržování tepelného komfortu v jejich obytných a pracovních prostorech či jako součásti vyhřívání určitých prvků družic, sond nebo vesmírných lodí a stanic.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Encyclopedia Britannica* | *Britannica* [online]. [vid. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/>
- [2] HOLUBOVÁ, Renata a Pavlína KEPRTOVÁ. *Repetitorium středoškolské fyziky* [online]. 2012 [vid. 2021-04-01]. Dostupné z: [http://fyzweb.cz/materialy/vlachovice/2013/materialy/holubova/b-holubova-repetitorium\\_fyziky.pdf](http://fyzweb.cz/materialy/vlachovice/2013/materialy/holubova/b-holubova-repetitorium_fyziky.pdf)
- [3] *Teplo, teplota, měrná tepelná kapacita* | *Onlineschool.cz* [online]. [vid. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://onlineschool.cz/fyzika/teplo-teplota-merna-tepelna-kapacita/>
- [4] INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P., BERGMAN, T.L., LAVINE, A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* [online]. 6th vyd. B.m.: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 9780471457282. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-15793-1\_19
- [5] GREENE, George Alanson. Heat Transfer. In: *Encyclopedia of Physical Science and Technology* [online]. B.m.: Elsevier, 2003, s. 279–292. Dostupné z: doi:10.1016/B0-12-227410-5/00312-4
- [6] *Jaký je rozdíl mezi přenosem tepla vedením, prouděním a sáláním? - Portál pro strojní konstruktéry* [online]. [vid. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezi-prenosem-tepla-vedenim-proudenim-a-salanim>
- [7] LUPI, Sergio. *Fundamentals of Electroheat* [online]. 1. vyd. Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-46014-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-46015-4
- [8] *Onlineschool.cz* | *Puť si víc svobody do života* [online]. [vid. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://onlineschool.cz/>
- [9] BALMER, Robert T. The First Law of Thermodynamics and Energy Transport Mechanisms. In: *Modern Engineering Thermodynamics* [online]. B.m.: Elsevier, 2011, s. 99–146. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-374996-3.00004-X
- [10] *Top 10 Thermally Conductive Materials - Thermtest Inc.* [online]. [vid. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://thermtest.com/thermal-resources/top-10-thermally-conductive-materials>
- [11] *Convection - Conduction, convection and radiation - GCSE Physics (Single Science) Revision - BBC Bitesize* [online]. [vid. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zttrd2p/revision/2>
- [12] *4 SÁLÁNÍ TEPLA-RADIACE*. nedatováno.
- [13] ZAHRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika* [online]. 2011. ISBN 9788001049389. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-3-elektrotepelná.pdf>
- [14] *Thermal-electrical analogy: thermal network 3.1 Expressions for resistances*. nedatováno.
- [15] *Cambridge Dictionary* | *English Dictionary, Translations & Thesaurus* [online]. [vid. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://dictionary.cambridge.org/>
- [16] *The History of Electric Heating* [online]. [vid. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.electricradiatorsdirect.co.uk/news/the-history-of-electric-heating/>
- [17] *History of Electrical Heating* | *Electrical Safety First* [online]. [vid. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.electricalsafetyfirst.org.uk/blog/history-of-electrical-heating/>
- [18] *Chromel - an overview* | *ScienceDirect Topics* [online]. [vid. 2021-03-30]. Dostupné

- z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/chromel>
- [19] *Jouleovo teplo — Sbírka pokusů* [online]. [vid. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://fyzikalnipokusy.cz/1657/jouleovo-teplo>
- [20] *Elektrický proud a teplo | Eduportal Techmania* [online]. [vid. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/de/node/1673>
- [21] VÁCLAV, Vrána. *ELEKTRICKÉ TEPLLO* [online]. 2008 [vid. 2021-04-17]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FMMI/Prednasky/TEPLO\\_bc\\_08.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/TEPLO_bc_08.pdf)
- [22] *Arc heating | Article about arc heating by The Free Dictionary* [online]. [vid. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/arc+heating>
- [23] *Elektrický ohřev - odporový, dielektrický, obloukový, elektronový a laserový (5) - Časopis Elektro - Odborné časopisy* [online]. [vid. 2021-05-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/elektricky-ohrev-odporovy-dielektricky-obloukovy-elektronovy-a-laserovy-5--13708>
- [24] TOMÁŠ, Mlčák. *Elektrotechnika pro FMMI*. 2010. ISBN 9788024826011.
- [25] *Infračervené záření | TepelneZarice.cz* [online]. [vid. 2021-05-23]. Dostupné z: <https://www.tepelnezarice.cz/infracervene-zareni-2>
- [26] *Elektrický ohřev mikrovlnný (7) - Časopis Elektro - Odborné časopisy* [online]. [vid. 2021-05-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/elektricky-ohrev-mikrovlnny-7--13616>
- [27] NOVÁK PAVEL. *ZÁKLADY ELEKTROTEPELNEJ TECHNIKY*. nedatováno.
- [28] *3D Printed Electronics - Aerosol Jet Technology - Optomec* [online]. [vid. 2021-05-24]. Dostupné z: <http://optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/>
- [29] *Aerosol Jet Printing aneb když tranzistor prochází tryskou | Vývoj.HW.cz* [online]. [vid. 2021-05-24]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [30] NAVRÁTIL, Jiří. *Aerosol Jet ® technology opportunities*. nedatováno.
- [31] *DARPA – Wikipedie* [online]. [vid. 2021-05-24]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/DARPA>
- [32] *AEROSOL JET ® PRINTED ELECTRONICS OVERVIEW*. nedatováno.
- [33] BINDER, Sebastian, Markus GLATTHAAR a Edda RÄDLEIN. Analytical investigation of aerosol jet printing. *Aerosol Science and Technology* [online]. 2014, 48(9), 924–929 [vid. 2021-05-24]. ISSN 15217388. Dostupné z: doi:10.1080/02786826.2014.940439
- [34] WADHWA, Arjun. Run-time Ink Stability in Pneumatic Aerosol Jet Printing Using a Split Stream Solvent Add Back System. *Theses* [online]. 2015 [vid. 2021-05-24]. Dostupné z: <https://scholarworks.rit.edu/theses/8597>
- [35] HRABÁK, Bc Petr. *ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ DIPLOMOVÁ PRÁCE Depoziční technologie Aerosol Jet Printing*. 2016.
- [36] *AEROSOL JET ® Materials FAQs* [online]. [vid. 2021-05-24]. Dostupné z: [http://optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ\\_Materials\\_FAQs\\_DS\\_v3.pdf](http://optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ_Materials_FAQs_DS_v3.pdf)
- [37] *Aerosol Jet materials* [online]. [vid. 2021-05-24]. Dostupné z: <http://optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/>
- [38] GODLINSKI, Dirk a Reinhard SCHLITT. Printed Heaters for Space Applications. 2000, (1).
- [39] BACKER ELEKTRO CZ. *Tištěná topná tělesa* [online]. nedatováno [vid. 2021-05-25]. Dostupné z: [https://www.backer-elektro.cz/sites/default/files/images/tistena\\_topna\\_telesa\\_cz.pdf](https://www.backer-elektro.cz/sites/default/files/images/tistena_topna_telesa_cz.pdf)

- [40] *Printed heating elements* [online]. 2014 [vid. 2021-05-25]. Dostupné z: [https://www.backer-elektro.cz/sites/default/files/images/tistena\\_topna\\_telesa\\_cz.pdf](https://www.backer-elektro.cz/sites/default/files/images/tistena_topna_telesa_cz.pdf)
- [41] LAUGHTON, M. A. a D. J. WARNE. *Electrical Engineer 's Reference Book*. 2003, 1498.
- [42] *What Is Induction Heating?* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/multiphysics/induction-heating>
- [43] *Infrazářič – Co to je a jak funguje? - ALTATRADING.cz* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: <https://www.altatrading.cz/clanky-o-infrazaricich/infrazaric-co-to-je-a-jak-funguje/>
- [44] *IQ-AERO černý / Elektrický karbonový zářič / e-Teplo.cz* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: <https://www.e-teplo.cz/elektricky-karbonovy-zaric-iq-aero-cerny.html>
- [45] *Infrazářiče - Topidla* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: <https://www.jadal.cz/clanek/infrazarice-topidla/>
- [46] *Car Heater Blowing Cold Air | How to Fix Car Heater* [online]. [vid. 2021-05-25]. Dostupné z: <https://www.popularmechanics.com/cars/a3270/whats-wrong-with-my-cars-heater-16078844/>
- [47] *Topení v autě část 1 | Turbo-Tec Czech* [online]. [vid. 2021-05-25]. Dostupné z: <http://www.turbo-tec.eu/cz/blog/topeni-v-aute-cast-1/>
- [48] *Printed Heaters: Automotive and Aerospace Industry* [online]. [vid. 2021-05-25]. Dostupné z: <https://butlertechnologies.com/automotive-aerospace-heaters/>
- [49] *Efficient heating for electric cars* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: <https://phys.org/news/2015-09-efficient-electric-cars.html>
- [50] ALTMANN, Dieter a Eberhard HAUPT. *United States Patent (19) Altmann et al. 54. HEATED SEAT*. nedatováno.
- [51] *Positive Temperature Coefficient (PTC) Heater Manufacturer | GMN* [online]. [vid. 2021-05-25]. Dostupné z: <https://gmnameplate.com/capabilities/ptc-heaters>
- [52] *SECO KOMOS* [online]. [vid. 2021-05-25]. Dostupné z: [http://secokomos.com/eng/laboratory/hs\\_wheel.php](http://secokomos.com/eng/laboratory/hs_wheel.php)
- [53] *Screen printed heater for vehicle elements - patent* [online]. [vid. 2021-05-25]. Dostupné z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/1f/7c/92/25db7d2785fa92/US20060011596A1.pdf>
- [54] *The windshield for all seasons comfort | AGC Glass Europe* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: <https://www.agc-glass.eu/en/news/story/windshield-all-seasons-comfort>
- [55] *AGC HeatControl Windshield – multifunctional silver coating explained | AGC Automotive Replacement Glass* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: <https://www.agc-arg.com/uk/node/382>
- [56] *Windshield heating device - Patent*. nedatováno.
- [57] *Volkswagen Put an Invisible Layer of Silver in Its New Windshields to Melt Away Snow* [online]. [vid. 2021-05-25]. Dostupné z: <https://gizmodo.com/volkswagen-put-an-invisible-layer-of-silver-in-its-new-1791624687>
- [58] *Technical specification - de-icing fluid* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: [https://www.aero-sense.com/sites/default/files/2021-01/TDS - TYPE I DE-ICING FLUID\\_5.pdf](https://www.aero-sense.com/sites/default/files/2021-01/TDS - TYPE I DE-ICING FLUID_5.pdf)
- [59] *Airplane deicing: The how and why - CNN.com* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: <http://edition.cnn.com/2010/TRAVEL/12/22/airplane.deicing/index.html>

- [60] VISHWANATH BIKKANAVAR, Karan. *COMPUTATIONAL METHODOLOGY FOR ELECTRO-THERMAL ICE PROTECTION SYSTEM ANALYSIS*. 2016.
- [61] US EPA, OW. Airport Deicing Effluent Guidelines Documents [online]. nedatováno [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/eg/airport-deicing-effluent-guidelines-documents>
- [62] *The Pros And Cons Of Chemical Plane Deicing - Industrial and Manufacturing Jobs For Economic Growth* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: <http://gh-clock.com/2017/09/19/the-pros-and-cons-of-chemical-plane-deicing/>
- [63] *De-ice Ice Baby - KLM Blog* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: <https://blog.klm.com/de-ice-ice-baby/>
- [64] MCCORMICK C. *Infrared Deicing: Giving glycol a run for its money* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: <https://www.wingsmagazine.com/content/view/1325/38/>
- [65] SOUSTAVY LETADEL, Odmrazovací a Autor PRÁCE ALEŠ SMÉKAL. *FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ LETECKÝ ÚSTAV FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING* . nedatováno.
- [66] *Effective de-icing skin using graphene-based flexible heater | Elsevier Enhanced Reader* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1359836818321620?token=C3B3B9805294164CC9F1B9F04EF41E2EDA8581CB61C7A188F9CFE4FFE01AF1F22C8D4F4086EC98174D3691BCF1B3829A&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210525224411>
- [67] HUNG, Ching-Cheh, Michael E DILLEHAY a Mark STAHL. *NASA - A Heater Made From Graphite Composite Material for Potential Deicing Application*. 1987.