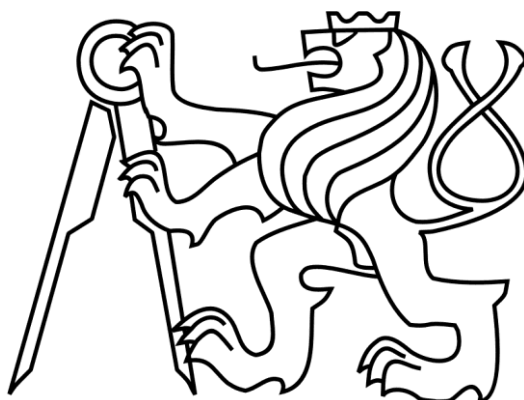


**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta elektrotechnická**

**katedra elektrotechnologie**



**Vliv okolního prostředí na tlustovrstvé struktury**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**Autor práce:**

**Bc. Eichler Petr**

Author

**Vedoucí práce:**

**Ivana Pelikánová Beshajová Ing., Ph.D.**

Supervisor

**Praha**

**2016**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
katedra elektrotechnologie

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Petr Eichler**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Technologické systémy

Název tématu: **Vliv okolního prostředí na tlustovrstvé struktury**

### Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši věnovanou struktuře tlustých vrstev a jejich vlastnostem.
2. Popište typy degradačních prostředí.
3. Připravte vzorky vrstev, podrobte je působení vybraných vlivů okolí a průběžně sledujte změny parametrů vrstev.
4. Analyzujte vady vzniklé působením degradačních faktorů. Vyhodnoťte též závislosti parametrů měřených struktur na době působení a typu degradačního prostředí.

### Seznam odborné literatury:

- [1] GUPTA, Tapan. *Handbook of thick- and thin-film hybrid microelectronics*. New Jersey, 2003
- [2] KUDLÁČEK, Ivan. *Degradační procesy 1*. ČVUT, Praha, 1994
- [3] SCHWEITZER, Philip A. *Atmospheric degradation and corrosion control*. New York : Dekker, 1999

Vedoucí: Ivana Pelikánová Beshajová Ing., Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Ing. Karel Dušek, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 8. 3. 2016

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá degradačními procesy a vlivu okolí na tlustovrstvou strukturu. První část pojednává o vlastnostech, elektrických parametrech, složení a tvorbě tlustých vrstev. Následující část se zaměřuje na degradační působení provozního prostředí a jeho členění. V této kapitole jsou také popsány činitele provozního prostředí a jeho klasifikace. Třetí část práce poukazuje na různé znehodnocující děje, jejich mechanismus a dopad na materiál. Poslední část je zaměřena na praktickou část, kdy byly nanесeny příslušné vrstvy a posléze byly testovány v klimatických komorách.

## **Klíčová slova**

Tlustá vrstva, elektrické parametry, degradační procesy, provozní prostředí, klimatické komory, vizuální kontrola.

## **Abstract**

This thesis deals with degradation processes and the influence of surroundings on the thick-film structure. First part of thesis deals with attributes, electrical parameters, structure and creation of thick-films. Second part focuses on degradative actions of operating environment and its divisions. In this chapter are also described factors and classifications of operating environment. Third part of thesis points out different devaluing happenings and mechanics and impact on materials of these devaluing happenings. Last chapter deals with practical part of this thesis in which were applied appropriate layers, and then were those layers tested in climatic test chambers.

## **Keywords**

Thick-film, electrical parameters, degradation processes, operating environment, climatic test chambers, visual check.

## **Bibliografická citace díla:**

EICHLER, P. *Vliv okolního prostředí na tlustovrstvé struktury*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2016. 77 s. Diplomová práce.

## **Prohlášení autora o původnosti díla:**

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních, a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Praze dne 5. 5. 2016

.....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Ivaně Pelikánové Beshajové Ph.D. za vedení práce, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování tohoto projektu. Děkuji také všem, kteří svou měrou přispěli ke vzniku této odborné práce. Velký dík patří také mým přátelům a blízkým za podporu při psaní této diplomové práce.

# Obsah

Seznam obrázků .....	7
Seznam tabulek .....	8
Úvod.....	9
1 Tlustovrstvá technologie .....	10
1.1 Tlustá vrstva.....	10
1.2 Tlustovrstvé pasty .....	11
1.3 Dělení tlustých vrstev.....	12
1.4 Složky past .....	13
1.5 Elektrické vlastnosti tlusté vrstvy .....	14
1.6 Substráty pro tlusté vrstvy.....	17
1.7 Metody pro nanášení tlustých vrstev.....	19
1.7.1 Sítotisk.....	19
1.7.2 Šablonový tisk .....	27
1.7.3 Micro-Screen .....	29
1.7.4 Dispensing .....	30
1.7.5 Jetting .....	31
2 Degradální působení provozního prostředí.....	32
2.1 Třídění provozního prostředí.....	33
2.2 Činitelé provozního prostředí.....	34
2.3 Klasifikace činitelů provozního prostředí .....	38
2.4 Klasifikace dějů znehodnocení.....	39
2.5 Klasifikace provozního namáhání.....	39
3 Znehodnocování materiálu.....	42
3.1 Vlhkostní znehodnocování.....	42
3.1.1 Zákonitosti vlhkého vzduchu.....	42
3.1.2 Mechanismus vlhkostního namáhání .....	44
3.2 Teplotní znehodnocování.....	49

3.2.1	Degradace při krátkodobém působení teploty .....	49
3.2.2	Degradace při dlouhodobém působení teploty .....	49
3.3	Korozní znehodnocování.....	51
3.3.1	Mechanismus koroze .....	51
3.3.2	Korozní napadení.....	53
4	Praktická část.....	56
4.1	Testovací struktury .....	56
4.2	Použité tlustovrstvé pasty .....	57
4.3	Použité klimatické podmínky .....	58
4.4	Postup zhotovení tlustovrstvé vrstvy .....	59
4.5	Postup měření odporu tlustovrstvé vrstvy .....	61
4.6	Vyhodnocení měření .....	62
4.6.1	Sumarizace natištěných cest .....	62
4.6.2	Vizuální kontrola .....	65
4.6.3	Vyhodnocení naměřených odporů .....	68
	Závěr.....	72
	Seznam symbolů.....	74
	Seznam použité literatury .....	76

# Seznam obrázků

Obr. 1: Řez rezistorem realizovaným tlustou vrstvou.....	10
Obr. 2: Závislost viskozity tlustovrstvé pasty na tlaku těrky v průběhu tisku.....	11
Obr. 3: Rozměry tlustovrstvé vrstvy .....	14
Obr. 4: Graf pro určení šířky vodiče .....	16
Obr. 5: Postup nanášení pasty na substrát pomocí sítotisku.....	19
Obr. 6: Vývojový diagram technologie vytváření tlustých vrstev .....	20
Obr. 7: Napínání síta .....	21
Obr. 8: Parametry síta.....	21
Obr. 9: Sítotisková stavba vrstvy .....	22
Obr. 10: Teplotní profily tlustovrstvých past .....	23
Obr. 11: Pružnost a protažení síta .....	24
Obr. 12: Vliv tkaniny na tvar okrajů čáry .....	24
Obr. 13: Vliv úhlu síta a obrazce.....	25
Obr. 14: Schéma šablony při tisku .....	26
Obr. 15: Přímá šablona.....	26
Obr. 16: Nepřímá šablona .....	27
Obr. 17: Postup nanášení pasty na substrát pomocí šablonového tisku .....	28
Obr. 18: $\mu$ -Screen .....	30
Obr. 19: Dispensing plnou jehlou .....	30
Obr. 20: Bezkontaktní dispensing .....	31
Obr. 21: Princip jettingu.....	31
Obr. 22: Vlivy působící na funkční schopnost zařízení .....	32
Obr. 23: Třídění provozního prostředí .....	33
Obr. 24: Mollierův $i - x$ diagram .....	44
Obr. 25: Hystereze u sorpčně-desorpční izotermy .....	47
Obr. 26: Mechanismus bobtnání .....	48
Obr. 27: Kondenzace vody na povrchu.....	48
Obr. 28: Zkondenzované množství vodní páry na povrchu .....	48
Obr. 29: Základní druhy korozního napadení .....	53
Obr. 30: Použité nanesené motivy.....	56
Obr. 31: Tepelná komora .....	58
Obr. 32: Korozní komora LIEBISCH KB 300.....	58
Obr. 33: Exsikátor .....	59
Obr. 34: Ruční sítotisk .....	60

Obr. 35: Dvoubodová metoda měření odporu .....	61
Obr. 36: Multimetr HP 34401A.....	62
Obr. 37: Vliv křivé podložky na odtrh .....	62
Obr. 38: Rozlitá pasta – spojení dvou vedlejších čar.....	63
Obr. 39: Neslitá pasta – vytváření ostrůvků .....	63
Obr. 40: Vliv ucpání ok .....	64
Obr. 41: Vizuální kontrola vzorků stříbrné pasty .....	65
Obr. 42: Vizuální kontrola vzorků s nanesenou ochrannou vrstvou.....	66
Obr. 43: Prasknutý puchýřek .....	66
Obr. 44: Popraskání ochranné vrstvy .....	67
Obr. 45: Odloupení vrstvy.....	67
Obr. 46: Korozní znehodnocení.....	68
Obr. 47: Vliv okolí na uhlíkovou pastu .....	69
Obr. 48: Vliv okolí na stříbrnou pastu .....	69
Obr. 49: Vliv okolí na uhlíkovou pastu s ochrannou vrstvou.....	70
Obr. 50: Vliv okolí na stříbrnou pastu s ochrannou vrstvou.....	71
Obr. 51: Vzniklé malé trhlinky .....	71

## Seznam tabulek

Tab. 1: Charakteristické vlastnosti materiálů .....	18
Tab. 2: Vlastnosti keramických materiálů používaných pro výrobu substrátů.....	18
Tab. 3: Základní činitele provozního prostředí a jejich degradační projevy .....	34
Tab. 4: Základní klasifikace podmínek vnějšího prostředí.....	40
Tab. 5: Sdružený typ klimatu .....	40
Tab. 6: Snížení tlaku vodní páry nad meniskem.....	46
Tab. 7: Délky jednotlivých cest.....	56
Tab. 8: Souhrn vytvořených cest .....	64



# Úvod

V dnešní době se neustále setkáváme s rozvojem elektroniky, která je nedílnou součástí lidských životů. Výzkum je zaměřený na miniaturizaci součástek a tím i zlepšení výrobních technologií. S rostoucími nároky na elektroniku souvisí i zvýšení kvality odolnosti proti klimatickým jevům. Díky tomuto trendu se dostaly do popředí vrstevové technologie, které díky velkému množství materiálu splňují vysoké nároky na kvalitu i v nejtěžších podmínkách. Díky velkému využití této technologie se dnes stále rozvíjí jak tlustovrstvá tak i tenkovrstvá technologie a vznikají tím stále nové techniky jak vrstvy efektivně a kvalitně nanášet.

První kapitola této práce se zejména zabývá tlustovrstvou technologií. Je zde rozebráno složení anorganických i polymerních past. Dále se zabývá vhodnou volbou substrátu a jeho vlivu na kvalitu natištěných struktur. Jsou zde i popsány základní elektrické parametry, podle kterých můžeme posuzovat a rozdělovat typy tlustovrstvých past. Poslední část první kapitoly pojednává o technikách nanášení past na substrát. Jsou zde popsány jak nejjednodušší techniky jako jsou sítotisk či šablonový tisk, ale také zde poukazují na modernější techniky a to zejména dispensing nebo jetting. U jednotlivých technik se zaměřuji na jejich výhody a posouzení kvality. Dále u sítotisku popisují celý proces tvorby vrstev a jednotlivé parametry, které mají vliv na jejich kvalitu.

Druhá kapitola pojednává o degračním působení provozního prostředí, jeho třídění a různé klasifikace. V této kapitole je kladen velký důraz na činitele provozního prostředí, jejich základní degrační projevy a jejich důsledky. V této práci rozděluji činitele do tří základních skupin a to na činitele klimatického, mechanického a elektrického původu.

Ve třetí kapitole se zaměřuji na různé znehodnocující děje pro materiály a to zejména na ty, které se vyskytují při mém testování struktur. Jedná se o děje vlhkostního, teplotního a korozního charakteru. Jsou zde popsány mechanismy působení na materiál a dále jejich následný vliv a dopad při vystavení těmto vlivům.

Poslední kapitola je věnovaná praktické části diplomové práce. Snažil jsem se v ní zjistit, jaký vliv mají různá klimatická prostředí na natištěné vrstvy pomocí sítotisku. Použil jsem dvě rozdílné pasty a sledoval vývoj elektrického odporu v čase a také vizuální změny, které jsem následně popsal a zhodnotil. Naměřené hodnoty elektrického odporu jsem vyhodnotil a zanesl typické průběhy do grafů.

# 1 Tlustovrstvá technologie

Tlustovrstvou technologií můžeme zařadit do takzvané vrstevové technologie. Vrstvová technologie je označení pro přípravu vrstev, kde tloušťka vrstvy je výrazně menší než ostatní rozměry – délka, šířka. Pomocí této technologie můžeme nanášet na nosný materiál (substrát) různé vodivé, odporové a dielektrické (resp. izolační) materiály. Tímto způsobem lze vytvářet odpory v hybridních integrovaných obvodech, vodivé propojky, senzory, topná tělesa nebo spousty jiných prvků. Základní charakteristikou vrstevové technologie je struktura, u které nás zejména zajímá tloušťka vrstvy, jenž hraje velkou roli při konečných vlastnostech.

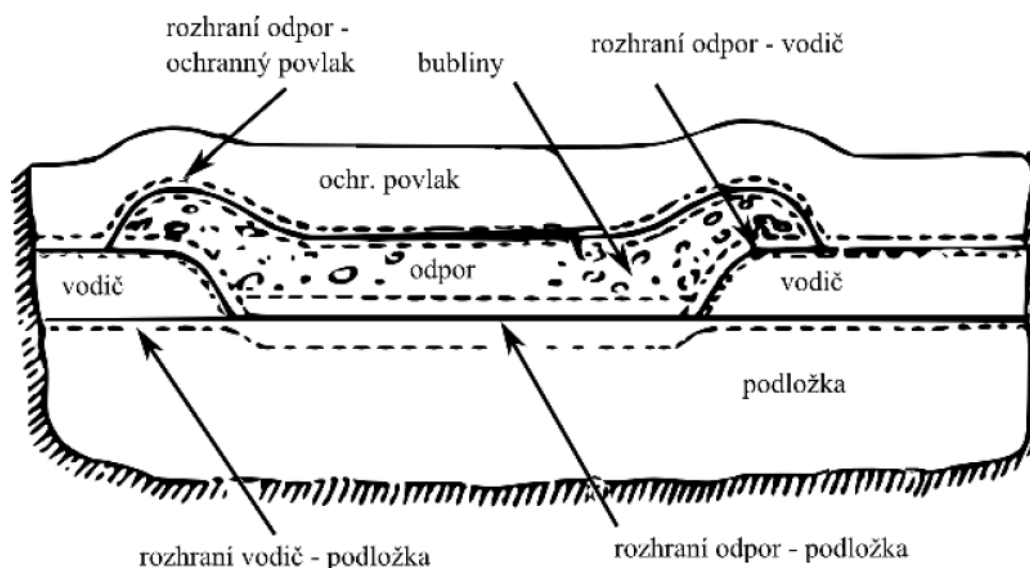
Dle tloušťky vrstvy a způsobu nanášení můžeme určovat dvě různé technologie, které mají významný vliv na finální vlastnosti vrstvy. Jsou to technologie: [1], [5]

- **tlustovrstvé** (typickým způsobem nanášení je sítotisk),
- **tenkovrstvé** (typickým způsobem nanášení je napařování nebo napařování).

## 1.1 Tlustá vrstva

Pod pojmem tlustá vrstva si můžeme představit vrstvu, jejíž tloušťka je podstatně větší než je střední volná dráha elektronu. Střední volná dráha je dráha, kterou průměrně urazí částice mezi dvěma srážkami. U tlustých vrstev se tloušťka nejčastěji pohybuje od několika  $\mu\text{m}$  až po desítky  $\mu\text{m}$ . [3]

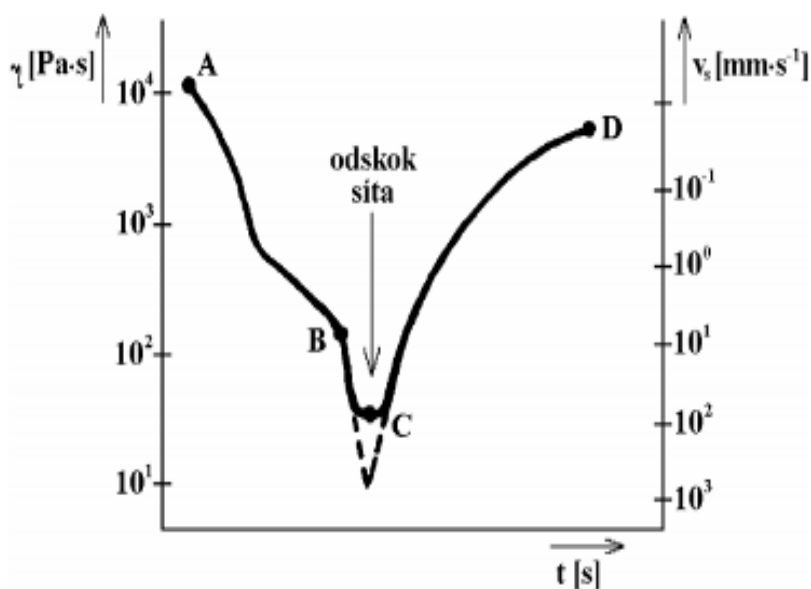
Obr. 1: Řez rezistorem realizovaným tlustou vrstvou [11]



## 1.2 Tlustovrstvé pasty

Materiálem pro výrobu pasivních sítí jsou tak zvané pasty. Tyto nehomogenní pasty se skládají z více složek, každá z jednotlivých složek má rozdílné fyzikální a chemické vlastnosti s odděleným povrchovým napětím. Jednou z nejdůležitějších vlastností past je jejich viskozita (vnitřní tření). Viskozita nám udává, jak se daná pasta brání pohybu, a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Tlustovrstvé pasty mají velmi dobré tixotropní vlastnosti, což znamená, že při změně mechanického tlaku se mění viskozita dané pasty. Toho se využívá při sítotisku, kdy pomocí těrky protlačujeme pastu skrz volná oka síta na danou podložku. Nejnižší viskozity se dosahuje právě tehdy, kdy se pasta ze síta přenáší na podložku. [1], [10]

Obr. 2: Závislost viskozity tlustovrstvé pasty na tlaku těrky v průběhu tisku [4]



Jak zde z tohoto obrázku (Obr. 2) můžeme vidět, tak viskozita je nepřímě úměrná tlaku těrky. V bodě A se dosahuje největší viskozity, jelikož pasta je stále velmi viskózní. Tuto viskózní pastu začneme roztírat, čímž nám klesá její viskozita do použitelného stavu pro tisk (bod B). Tato hodnota nesmí být příliš vysoká ani příliš nízká. Když bude příliš vysoká, tak se motiv na substrát špatně vykreslí důsledkem špatného protlačení pasty. Pokud bude příliš nízká, tak se rozmaže námi chtěný motiv. V bodě C, kdy se pasta přenáší ze síta na podložku, má pasta přibližně viskozitu 50 Pa·s až 80 Pa·s. Z bodu C do bodu D nastává takzvaný leveling (vyrovnávání povrchu). Tento proces končí v bodě D, kdy povrch je již hladký. [6]

### 1.3 Dělení tlustých vrstev

Na rozdělení tlustých vrstev můžeme pohlížet z několika hledisek. První takové hledisko je materiál matrice. U anorganických vrstev je matrice tvořena nejčastěji z velmi jemno namletého skla, kterému říkáme frit. Tyto materiály se po nanesení na substrát vypalují při teplotách přesahujících 800 °C, a proto je potřeba mít podložku z odolného materiálu jako je keramika nebo sklo. Pokud použijeme polymerové pasty, u kterých je plnivem polymer (např. polyester), musíme počítat s určitými omezeními. Polymerní pasty se vytvrzují pod hranicí 200 °C a tím pádem je můžeme použít na více podložek než je tomu u anorganických past. Nevýhodou těchto past je, že velmi lehce navlhají, mají vyšší odpor, tím pádem nižší elektrickou, ale i tepelnou vodivost, a tím pádem i nižší celkovou zatížitelnost.

Druhým kritériem podle kterého můžeme třídit tlusté vrstvy je hledisko funkčnosti. Jednotlivé typy past rozlišujeme na vodivé, odporové, dielektrické a izolační nebo také speciální.

- **Vodivé** - pro vodivé pasty se používají jako funkční složka drahé kovy nebo jejich kombinace, především pro svoji stálost a netečnost vůči vlivům prostředí. Vodivé pasty se používají pro vytvoření zejména vodivých propojů, kontaktů a jiných vodivých částí.
- **Odporové** - rovněž se používají různé směsi drahých kovů a jejich oxidy. Hodnota odporu je zde nastavována poměrem vodivé (kovové) části a tavivové (skelné) složky. Odporové pasty je možno vyrobit ve velkém rozsahu hodnot odporu na čtverec, např.  $10\Omega$ - $10^9 \Omega/\square$
- **Dielektrické a izolační** - funkční složku pro dielektrické pasty tvoří materiály používané pro keramické kondenzátory (typ I na bázi  $\text{TiO}_2$  nebo typu II na bázi  $\text{BaTiO}_3$ ) a u izolačních past různé typy skel v práškové formě. Dielektrické pasty se používají pro výrobu kondenzátorů menších hodnot. Izolační pasta se používá pro křížení vodivých drah u vícevrstevných struktur. Do této skupiny patří též ochranné pasty, které slouží k ochraně součástek před působením vnějších vlivů.
- **Speciální** - jako tlusté vrstvy mohou být nanášeny i pasty z různých předem připravených práškových materiálů a směsí. Tyto materiály řadíme do skupiny speciálních past, jako jsou například termistorové, magnetické, luminiscenční, stínící a také pasty pro chemické senzory. [1], [7]

## 1.4 Složky past

Pro systémy anorganických past, při kterých se dosahuje při výpalu na keramický nebo skleněný substrát vysokých teplot nad 800 °C, popisujeme čtyři základní složky, které se nazývají funkční, pojivová, organická a modifikující. U těchto past se vyžaduje po dokončení operace vysoká adheze k podložce nebo k dříve vypálené tlusté vrstvě.

- **Funkční složka** - tato složka nám určuje, jaké hlavní vlastnosti bude pasta mít. Podle toho, jakou vrstvu vyžadujeme, se do pasty přidávají částice. Pokud chceme pastu vodivou, přidávají se částice drahých kovů (např. Au, Pt, Ag, Pd). U odporových past dáváme kovy nebo oxidy kovů (Ag, Au, RuO<sub>2</sub>). U izolačních, respektive dielektrických past, to je keramika a sklo (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BaTiO<sub>3</sub>). Velikost částic je velmi důležitá. Částice musejí být menší než je samotné oko síta. Správnou velikostí zrn se zaručuje definovaný přenos pasty přes síto na substrát.
- **Pojivová složka** - hlavním úkolem této složky je soudržnost pasty s podložkou. Jakmile začíná výpal, tyto složky se začnou spojovat. Pro tyto účely se využívá skleněná frit, která je rozdrcena do jemného prášku ze skla olovnatoboritokřemičitého, vizmutiokřemičitého nebo hliničitého. V pastě můžeme najít 3% až 4% objemu této složky.
- **Organická složka** - funkci nosiče výše uvedených složek plní organická složka. Můžeme ji rozdělit na dvě části, a to na polymerní a rozpustidlovou část. Polymerní část je obvykle tvořena polyvinylacetátem, polyvinylalkoholem, etylcelulózou apod. a z rozpustidel to je např. xylén a terpentýn. V průběhu sušení a počátku výpalu organická složka v oxidační atmosféře vyhoří.
- **Modifikující složka** - díky této složce můžeme ovlivnit vlastnosti při tisku, a to hlavně její viskozitu. Tato složka je aktivní při skladování a při samotném tisku. Jakmile vytvrzujeme vrstvu, tak se tato složka vypaří, a tudíž se nám nepodílí na konečných vlastnostech použité vrstvy. Nejvíce používaným materiálem pro tuto složku je borovicový olej, terpineol a jeho izomery, butylkarbizolacetát.

Pro polymerní pasty, při kterých se při vytvrzování nepřekračuje hodnota 200 °C a nanášejí se na plastové fólie nebo na desky plošných spojů, které by nevydržely stejně vysokou teplotu jako je tomu u anorganických vrstev, je skladba pasty podstatně jiná. U těchto past je vynechána složka pojivová a modifikující, jejichž funkci tak přebírá

materiálově odlišná složka organická. I poslední zbývající složka funkční má odlišnou skladbu. U odporových past se často vyskytuje uhlík a u izolačních past přebírá dielektrické vlastnosti samotná pryskyřice. [3]

## 1.5 Elektrické vlastnosti tlusté vrstvy

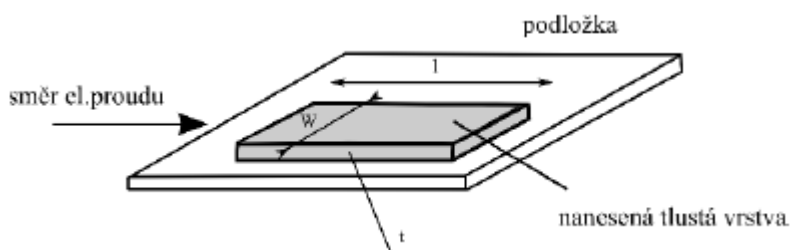
Mezi základní parametry odporových a vodivých vrstev, které se udávají, jsou:

- Vrstvový odpor – určuje nám hodnotu odporového materiálu pro konstantní tloušťku vrstvy. Často bývá označen jako odpor na čtverec. Jeho hodnotu lze odvodit z obecné definice odporu následovně:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} = R_v \cdot \frac{l}{w} = R_v \cdot A \quad (1)$$

kde	$R$	je hodnota odporu rezistoru [ $\Omega$ ],
	$\rho$	je měrný odpor [ $\Omega \cdot \text{m}$ ],
	$l$	je délka odporu [m],
	$S$	je plocha průřezu odporu [ $\text{m}^2$ ],
	$w$	je šířka odporu [m],
	$t$	je tloušťka odporu (vrstvy) [m],
	$R_v$	je vrstvý odpor [ $\Omega/\square$ ]
	$A$	je počet čtverců.

Obr. 3: Rozměry tlustovrstvé vrstvy [5]



- **Elektrická vodivost** – popisuje schopnost, jak dobře dokáže materiál vést elektrický proud. Elektrická vodivost udává velikost elektrického proudu procházejícího vodičem při jednotkovém napětí na jeho koncích. Čím větší je vodivost, tím větší elektrický proud prochází vodičem při stejném napětí.

Základní jednotkou elektrické vodivosti je siemens. Elektrická vodivost je dána vztahem:

$$G = \frac{I}{U} [\text{S}] \quad (2)$$

kde  $I$  je elektrický proud protékající vodičem a  $U$  je elektrické napětí na koncích vodiče.

- **Rezistivita** – je fyzikální veličina vyjadřující elektrický odpor vodiče jednotkové délky a jednotkového obsahu průřezu. Rezistivita je převrácená hodnota konduktivity. Rezistivita je materiálová konstanta, která charakterizuje elektrickou vodivost látky a je definována následujícím vztahem:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} [\Omega \cdot \text{m}] \quad (3)$$

kde  $R$  je odpor vodiče,  $S$  je obsah kolmého průřezu a  $l$  je délka vodiče.

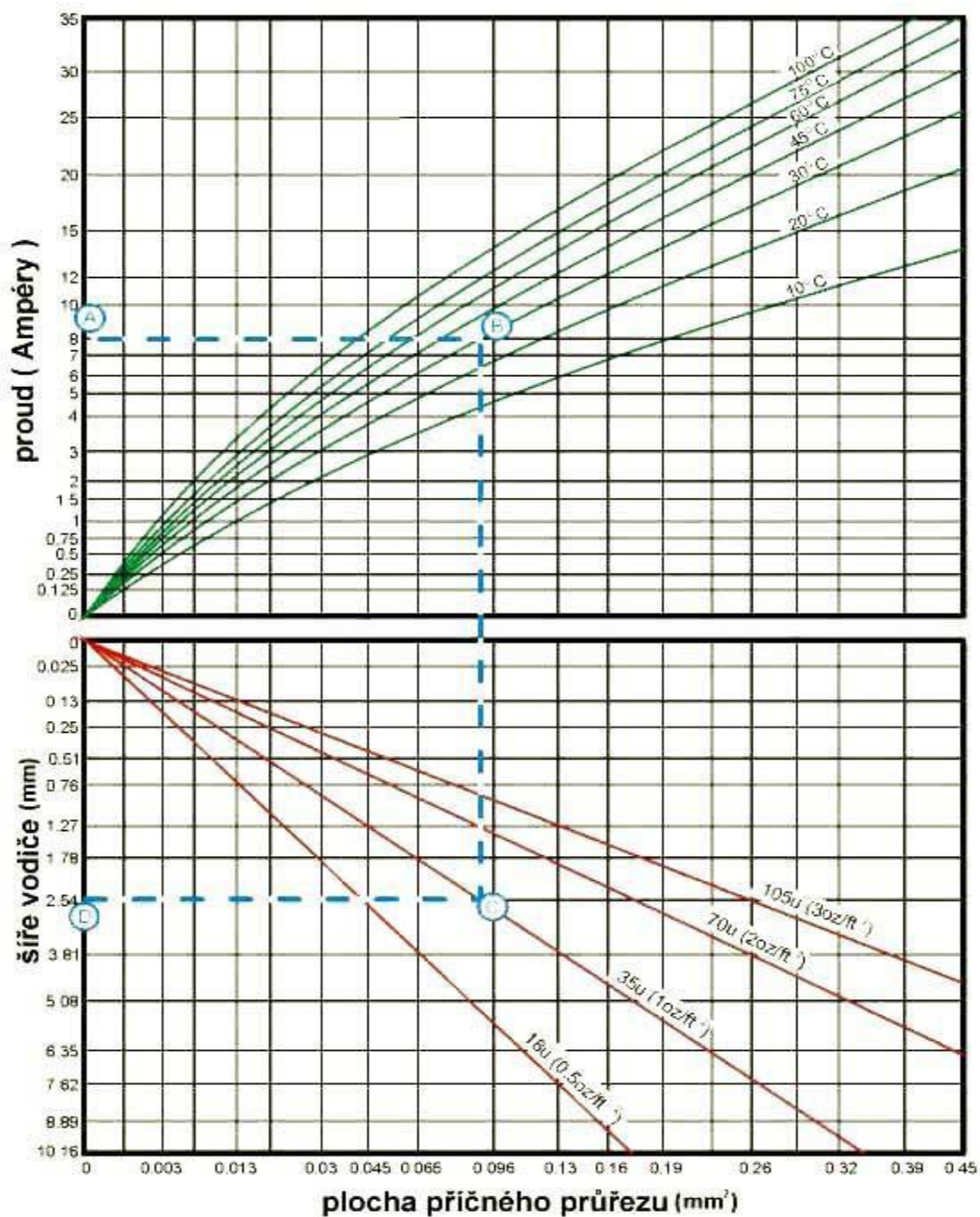
- **Teplotní koeficient odporu (TKR)** – konstanta, která vyjadřuje závislost odporu vodiče (polovodiče) na teplotě. Odpor elektrických vodičů s rostoucí teplotou stoupá, teplotní součinitel odporu má kladnou hodnotu. Odpor polovodičů s rostoucí teplotou klesá, teplotní součinitel odporu má zápornou hodnotu. TKR vyjadřujeme v jednotce  $\text{K}^{-1}$  a hodnota je dána vztahem:

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \Delta t} [\text{K}^{-1}] \quad (4)$$

kde  $R_0$  je počáteční odpor,  $\Delta R$  je rozdíl odporů při rozdílu teplot  $\Delta t$ .

- **Proudová zatížitelnost** – udává maximální proud, který může daným vodičem protékat. Překročení proudové zatížitelnosti ovlivňuje funkčnost obvodu a dochází k překročení maximální provozní teploty. Při překročení provozní teploty může dojít k přerušování vodivé cesty, dosažení destrukční teploty součástky, roztavení pájky apod. Proudová zatížitelnost se udává v jednotce ampér.

Obr. 4: Graf pro určení šířky vodiče [12]



**Příklad výpočtu:**

Požadujeme, aby protékal proud o hodnotě 8 Ampér při maximálním dovoleném oteplení 30 °C. Jak široký máme použít vodič při použití 35µm Cu-fólie?

V grafu označme bod **A**, což odpovídá proudu 8 Ampér a spojíme s křivkou teplotního nárůstu o 30 °C (bod **B**). Bod **B** vertikálně propojíme se spodní křivkou grafu odpovídající tloušťce Cu-fólie 35µm (bod **C**). Z bodu **C** na horizontální spojnici odečtete požadovanou šíři vodiče (bod **D**).

**V tomto případě vychází šíře vodiče na 2,5 mm. [12]**



U dielektrických vrstev se navíc udává ještě:

- **Vrstvová kapacita** – definujeme jako měrnou hodnotu vztaženou ke konstantní tloušťce dielektrika, které se nanáší jako jedna nebo častěji dvě vrstvy. U výpočtu vycházíme ze vztahu pro kapacitu deskového kondenzátoru:

$$C = 0,0885 \cdot \varepsilon_d \cdot \frac{a \cdot b}{t_d} = C_0 \cdot a \cdot b = C_0 \cdot S_c \quad (5)$$

kde  $\varepsilon_d$  je permitivita dielektrika [ $F \cdot m^{-1}$ ],  
 $t_d$  je tloušťka dielektrika [cm],  
 $a, b$  jsou rozměry stran kondenzátoru [cm],  
 $C_0$  je vrstvová (měrná) kapacita [ $pF \cdot cm^{-2}$ ],  
 $S_c$  je plocha kondenzátoru [ $cm^2$ ].

## 1.6 Substráty pro tlusté vrstvy

Mezi nejdůležitější parametr substrátu, který nás zajímá, patří teplotní koeficient roztažnosti. Ten by se co nejvíce měl blížit teplotnímu koeficientu tlusté vrstvy, kterou na podložku budeme nanášet. Mezi další významné parametry můžeme zařadit tepelnou vodivost materiálu. Ta by měla být pokud možno co největší. Tato vlastnost se nejvíce projeví u výkonových zařízení, kde potřebujeme odvést velké množství tepla. Podstatnou vlastností substrátu je také jejich rovnost, hladkost a zanedbatelná smrštitelnost při výpalu.

Pro anorganické tlusté vrstvy se nejčastěji používají jako podložky sklo nebo keramika. Sklo se využívá v případě, že se neočekávají vysoké výkony pro danou aplikaci. Mezi výhody keramiky můžeme zařadit jejich velmi dobrou elektrickou pevnost. Keramiky jsou tvrdé, ale jsou taky relativně křehké. Další dobrou vlastností keramik je tepelná vodivost, odolnost vůči klimatickým jevům nebo různým chemikáliím. Tyto podložky jsou také v čase stálé, což znamená, že nemění tvar a nejvíce únavu. Jsou taky značně odolné vůči otěru.

Mezi nejvíce používané keramiky v elektronice či mikroelektronice řadíme korundovou keramiku ( $Al_2O_3$ ), která se vyrábí z alumina (oxidu hlinitého). Využívá se zejména pro své dobré mechanické vlastnosti a relativně dobrou tepelnou vodivost, která činí 25 W/mK.

Dalším významným materiálem je aluminium-nitridová keramika (AlN), jejíž tepelná vodivost se pohybuje okolo 175 W/mK, což už je srovnatelné s určitými kovy.

U polymerních vrstev se pro podložku využívají organické materiály. Tyto materiály jsou založeny na izolantu z organické pryskyřice. Ve výrobě nalezneme hlavně pryskyřici fenolickou a epoxidovou (významný materiál je skloepoxid označovaný jako FR4). Mezi nevýhody těchto podložek řadíme zejména navlhavost a samozřejmě menší tepelnou odolnost než má substrát založený na keramice.

Při porovnání ceny organického a keramického substrátu zjišťujeme, že keramické substráty jsou výrazně dražší než jejich organická konkurence. Tato cena souvisí i se složitějším opracováním, které je možno provést například pomocí laseru. Cena pro keramický substrát bez realizované vodivé sítě a dalších součástek se pohybuje pro stejný typ elektrického obvodu na úrovni ceny desek z organických materiálů s realizovanými jednostrannými spoji. S rostoucí složitostí obvodů se však cena obvodu na keramickém substrátu začíná vyrovnávat s cenou obvodu realizovaného na plošném spoji. [3]

Tab. 1: Charakteristické vlastnosti materiálů používaných pro desky plošných spojů [1]

<b>Parametr / materiál</b>	<b>FR2</b>	<b>FR3</b>	<b>FR4</b>
<i>Permitivita (při 1 MHz)</i>	4,5	4,6	4,9
<i>Elektrická pevnost [kV·mm<sup>-1</sup>]</i>	60 - 70	60 – 65	35 – 65
<i>Tepelná vodivost [J·s<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]</i>	0,24	0,23	0,25
<i>Součinitel teplotní roztažnosti [ppm·K<sup>-1</sup>]</i>	11	13	11
<i>Adsorpce vlhkosti [%]</i>	0,8	0,75	0,35
<i>Pevnost v tahu [MPa·mm<sup>2</sup>]</i>	88	83	280

Tab. 2: Vlastnosti keramických materiálů používaných pro výrobu substrátů [1]

<b>Parametr / Materiál</b>	<b>AlN</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>BeO</b>	<b>LTCC</b>
<i>Tepelná vodivost <math>\lambda</math> [J·s<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]</i>	140 – 170	10 – 35	150 – 250	2 – 4
<i>Součinitel teplotní roztažnosti <math>\alpha</math> při 100 °C [10<sup>-6</sup>·K<sup>-1</sup>]</i>	2,65	5,5	5,4	4,3
<i>Elektrická pevnost <math>E_p</math> [kV·mm<sup>-1</sup>]</i>	15	> 10	10	8,5
<i>Měrný elektrický odpor <math>\rho</math> [Ω·cm]</i>	4·10 <sup>11</sup>	>10 <sup>14</sup>	10 <sup>13</sup> – 10 <sup>15</sup>	10 <sup>14</sup>
<i>Mechanická pevnost <math>R_m</math> [MPa]</i>	450	400	240	190
<i>Relativní permitivita <math>\epsilon_r</math> při 1 MHz</i>	8,9	9,7	6,7	2,5 – 8

## 1.7 Metody pro nanášení tlustých vrstev

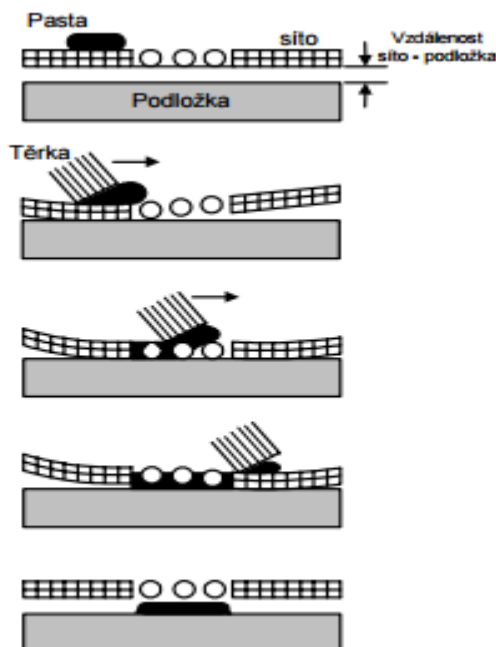
Pro konečné vlastnosti elektronického zařízení hraje velmi velkou roli kvalita nanášení tlustovrstvé pasty na substrát. Proto je důležité mít kvalitní mechanismus nanášení obrazce a dostatečně zvládnutou samotnou techniku. V dnešní době existuje hned několik kvalitních způsobů jak tyto pasty nanést. Nejčastější technologický postup, který se dnes používá, je sítotisk, šablonový tisk, popřípadě micro-screening. Další techniky, které se vyskytují a zde budou popsány, jsou metody přímého nanášení jako jetting a dispensing. Existují ještě další metody pro nanášení tlustých vrstev, ale v této práci nebudou již popsány.

### 1.7.1 Sítotisk

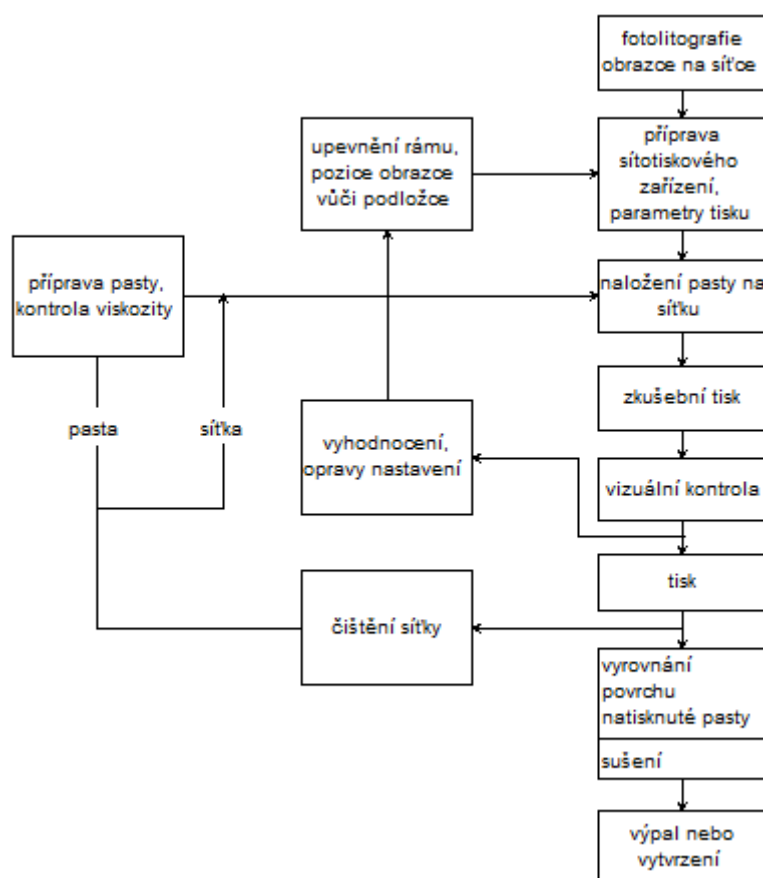
Nejstarší metodou pro nanášení tlustých vrstev je sítotisk, který se v elektronice využívá již od šedesátých let dvacátého století, a tato technologie se neustále vyvíjí. Její největší předností je, že touto technikou se dá nanést na podložku prakticky jakýkoliv obrazec při relativně nízkých nákladech.

Obecný postup technologie sítotisku je vyobrazen na vývojovém diagramu na Obr. 6. Hlavním principem této technologie je, že za pomoci těrky protlačujeme pastu skrz síto, kde je předem připravený motiv, na podložku. Schematické znázornění protlačení pasty na substrát je na Obr. 5.

Obr. 5: Postup nanášení pasty na substrát pomocí sítotisku [5]



Obr. 6: Vývojový diagram technologie vytváření tlustých vrstev [3]



### 1.7.1.1 Síta (síťovina)

Pro síťotisk se používají dva základní materiály, a to nerezová ocel nebo polyesterová vlákna. Dříve se tato síťovina napínala do dřevěných ráků a upevňovala se lepením nebo v jednodušších případech dokonce sponami. Dnes tento způsob je již překonán a na ráky se používají kvalitní materiály z hliníku nebo oceli. Pro samotné napínání se používají různé pneumatické či mechanické systémy. Hlavní funkcí ráku je držet napnuté síto po celou dobu jeho života. Mezi další vlastnosti můžeme zařadit teplotní dilataci, která by měla být nízká. Dále by rák měl zajišťovat rovinnost při tisku.

Z výše uvedeného vyplývá, že pro kvalitní tisk je zapotřebí mít správně napnutou tkaninu v ráku. Pro ideální vlastnosti by se mělo splnit několik základních požadavků. Prvním z nich je dodržování napětí udávané výrobcem. Dále mít napětí tkaniny rovnoměrné po celé ploše. Tohoto se dosáhne, když budeme tkaninu napínat s vlákny rovnoběžnými s napínacím rákem. Napětí by se mělo postupně zvyšovat nejméně 15 minut a mělo by se měřit v obou osách. Po přibližně 15 minutách by napětí mělo být ustálené a až tehdy jej můžeme připevnit k ráku. V prvních hodinách můžeme pozorovat, že dochází k různým poklesům napětí, a proto

by se měla síta používat nejdříve po jednom až dvou dnech, kdy by napětí síta mělo být již ustálené. Způsob napínání síta na rám je na Obr. 7.

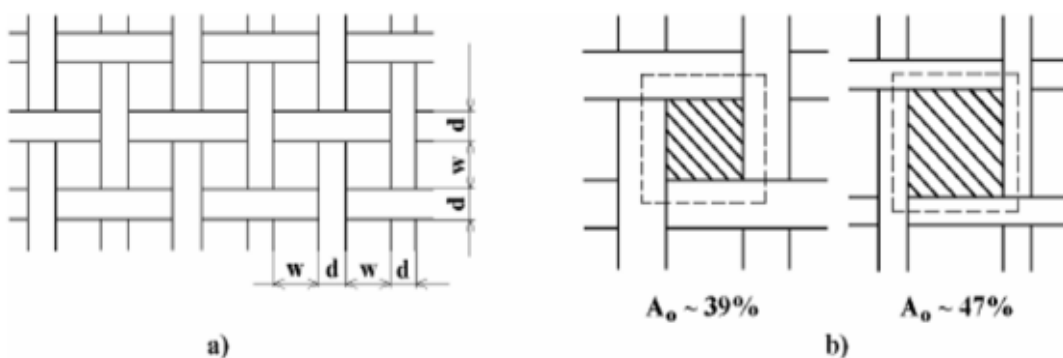
Obr. 7: Napínání síta [3]



Vzhledem k různým požadavkům tisku se používají různé typy tkaniny, mezi které řadíme zejména monofilní polyesterovou tkaninu, VA –tkaninu, metalizovanou monofilní polyesterovou tkaninu a monofilní nylonovou tkaninu. Pro výběr z těchto druhů tkanin nás zajímají požadavky na přesnost rozměrů, tloušťku tisku, jemnost motivů, ostrost obrazce, velikost částic pasty a strukturu povrchu. Tloušťka nanesené vrstvy bude korespondovat s technickými hodnotami tkaniny, jako je počet vláken na cm, tloušťka vlákna, velikost ok, volná plocha tkaniny a tloušťka tkaniny. S pomocí tloušťky tkaniny a volnou plochou tkaniny můžeme přibližně určit množství spotřebované pasty, což se nám hodí zejména při automatizovaném sítotisku. Vzhledem k jemnosti nanesených čar nebo mezer můžeme rozlišovat 3 kategorie. Buď má tkanina velikost oka větší než tloušťka vlákna, menší nebo stejnou. Pro správný průchod pasty skrz oka by mělo být zajištěno, aby velikost zrn pasty byla minimálně 2,5 až 3 krát menší než samotné oko síta.

Obr. 8: Parametry síta

a) velikost ok vs. průměr drátu b) světlost síta [1]



- **Hustota tkaniny**  $n$  (počet ok na délkovou jednotku), pro jejíž výpočet použijeme vzorec:

$$n = \frac{10}{w + d} \quad (6)$$

kde:  $w$  je rozměr strany volné plochy oka [mm],

$d$  je průměr vlákna [mm].

- **Světlost** (otevřená plocha) síta  $A_o$ , již lze určit ze vztahu:

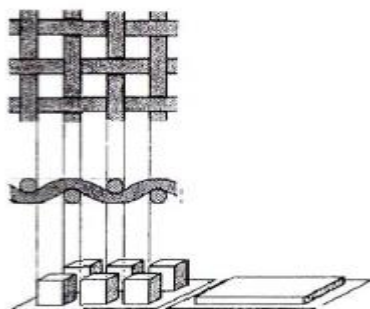
$$A_o = \left( \frac{w}{w + d} + d \right)^2 \cdot 100\% \quad (7)$$

Monofilní polyesterová tkanina se vyznačuje dobrými vlastnostmi v tahu a pružnosti. Její velkou předností je, že umožňuje 100 % zotavení do 2% protažení. VA – tkanina má oproti předešlé tkanině ocelová vlákna, a proto se vyznačuje vynikající rozměrovou stabilitou. S tím souvisí i obtížnější nastavení sítotiskového stroje, zejména vzdálenost síta od podložky a přítlak těrky. Kompromis mezi předešlými typy tkaniny je metalizovaná polyesterová tkanina. Tato tkanina má lepší vlastnosti v tahu než polyesterová tkanina, ale zároveň má vyšší elasticitu než je tomu u ocelového vlákna. Má též větší průměr vlákna, a tím pádem prochází sítem menší množství pasty, což se projeví na tloušťce nanesené vrstvy. Tato vlastnost se využívá pro tisk UV tvrditelných past. [3], [9]

### 1.7.1.2 Tisk

Vytváření vrstvy sítotiskem rozdělujeme na tři jednotlivé kroky. Jako první etapu označíme protlačení kvádrů pasty skrz oka na substrát. Velikost jednotlivých kvádrů je dána tloušťkou tkaniny a velikostí ok. V druhé etapě probíhá slévání výše zmíněných kvádrů do jedné vrstvy, načež se tato vrstva tímto sníží. Názorná ukázka tohoto děje je na Obr. 9. Slitím kvádrů by měla vzniknout kvalitní vrstva, která by neměla obsahovat žádné bubliny ani mezery. Tím se dostáváme do poslední fáze, kde se těkavé složky při sušení odpaří a tím nám ještě o něco klesne tloušťka vrstvy. Konečná tloušťka vrstvy tedy závisí na velikosti ok, tloušťce tkaniny, tekutosti pasty a také struktuře substrátu.

Obr. 9: Sítotisková stavba vrstvy [3]

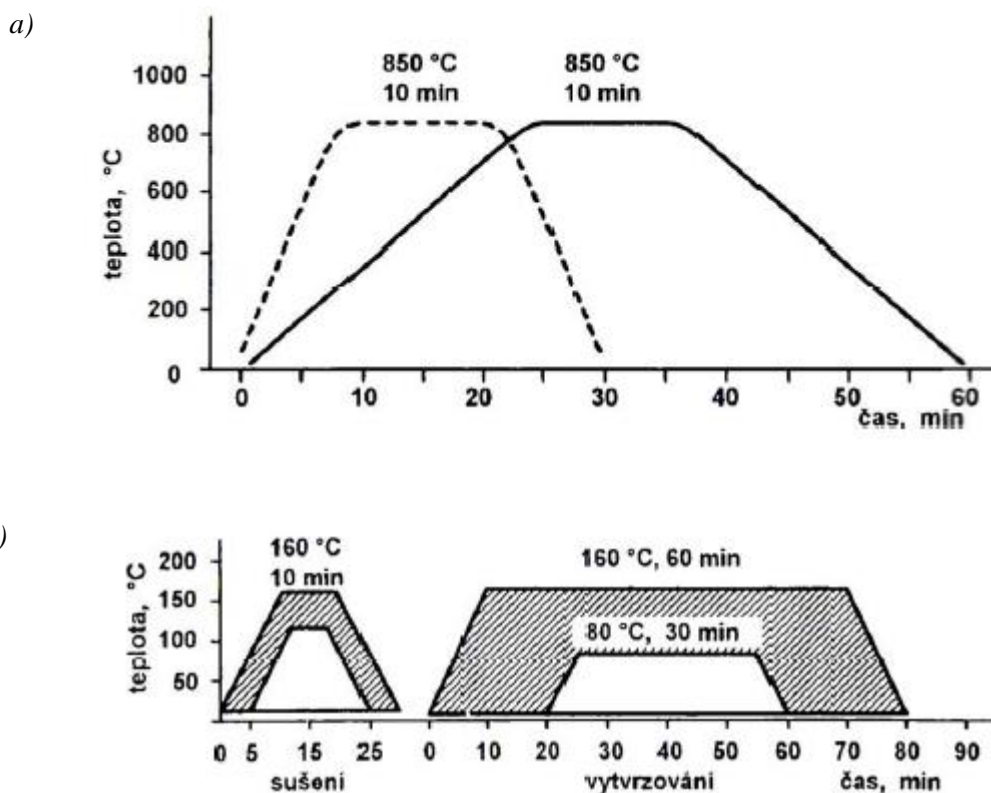


### 1.7.1.3 Teplotní zpracování past

Posledním krokem při sítotisku je tepelné zpracování pasty, které závisí na typu použité tlustovrstvé pasty. U polymerních past se tento krok nazývá vytvrzování a probíhá při nižších teplotách než je tomu u anorganických past. Tyto pasty mohou být vypalovány v oxidační nebo redukční atmosféře, měděné vodivé pasty oxidačně-redukčním procesem. Před samotným výpalem se pasty nechávají ustát a vysušit, přičemž vymizí těkavé látky, čímž získá vrstva větší mechanickou odolnost. Při procesu vypalování v oxidační atmosféře jsou nejdříve redukovány organické složky, začíná docházet k chemickým změnám funkčních složek a dále k měknutí skleněné frity. Tímto procesem vzniká struktura tlusté vrstvy, která se váže k substrátu. Při výpalu jsou použity vysoké teploty, ale tyto teploty nesmí roztavit složky, ale pouze je dostat do takzvaného plastického stavu. Pro výpal v oxidační atmosféře se většinou používá čistý vzduch, který zajistí levný provoz a dostatečnou kvalitu i pro pasty na bázi drahých kovů. Na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** jsou uvedeny teplotní profily současných anorganických past a polymerních past. [3]

Obr. 10: Teplotní profily tlustovrstvých past

a) anorganické pasty; b) polymerní pasty [3]

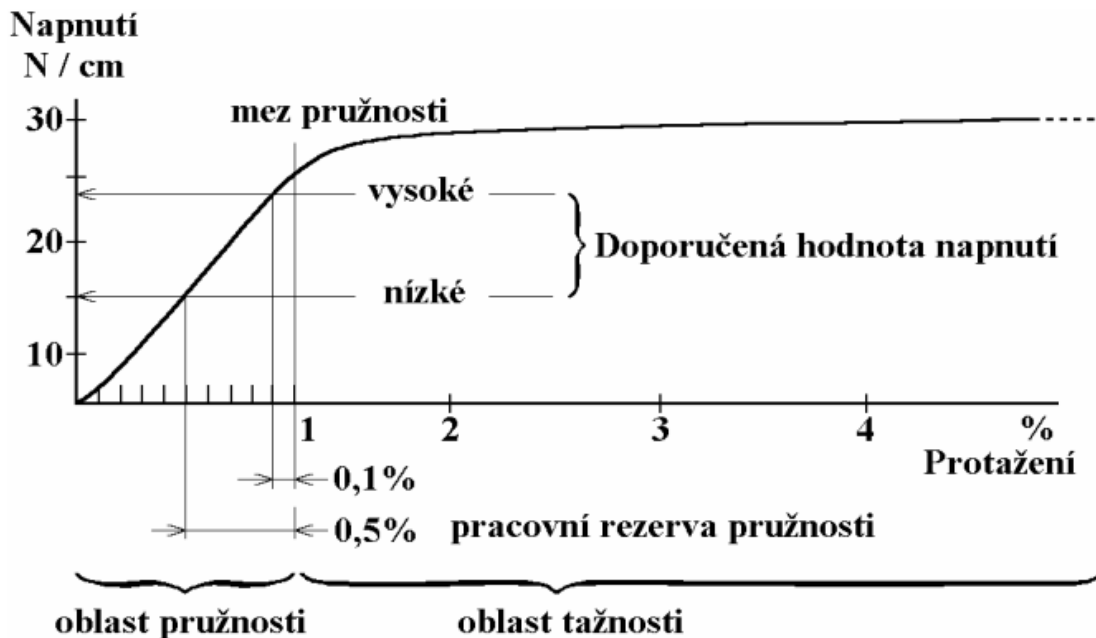


### 1.7.1.4 Kvalita tisku

Pokud budeme pozorovat přesnost tisku, tak zjistíme, že na jeho kvalitu má vliv několik skutečností. Pro přesný tisk musíme mít zvolený správný formát rámu a obrazce. Dále záleží na velikosti použité těrky, délce uražené dráhy a vzdálenosti síta od substrátu neboli odtrh. Neméně důležitou vlastností je zachování elasticity vláken. Tu můžeme narušit příliš velkým tlakem těrky nebo také přílišným napnutím síta v rámu. Síto by se mělo používat v mezi pružnosti, čemuž odpovídá lineární část na

Obr. 11. Každý typ tkaniny má hranici elasticity jinde. U metalizovaných vláken je to 2,5%, u polyesterových 3% a u VA – tkaniny je to pouze 1%. Časem napětí vlivem používání poklesne a je třeba znova síto do rámu napnout nebo jej vyměnit.

Obr. 11: Pružnost a protažení síta [2]



Dalším důležitým parametrem při tisku je minimální reprodukovatelná šíře čáry, která při realizaci sítotiskem dosahuje hodnoty cca 70 $\mu$ m. Šíři a tvar okraje nanesené čáry ovlivňuje typ použité tkaniny, počet a průměr vláken, velikost ok a volná plocha tkaniny. Na Obr. 12 je vidět rozdíl při použití dvou různých tloušťek vláken při stejném typu tkaniny.

Obr. 12: Vliv tkaniny na tvar okrajů čáry

a) Monofilní polyesterová tkanina 95T b) Monofilní polyesterová tkanina 95HD [3]

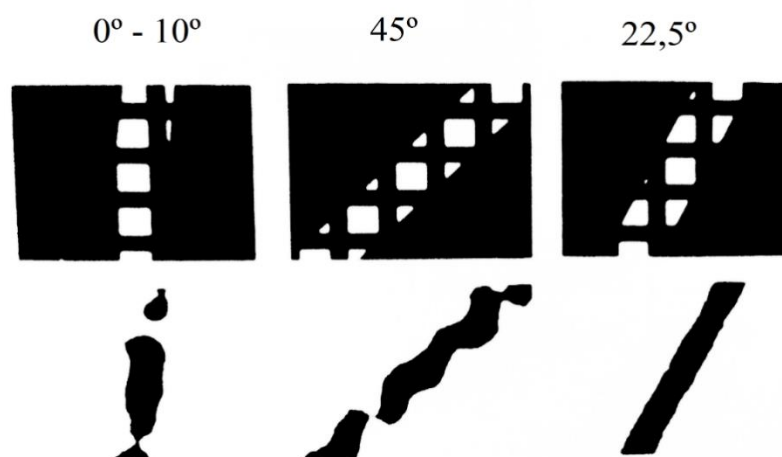




Velký vliv na výslednou šířku čáry je úhel směru vláken síta a tištěného motivu. Pokud budou linie čar paralelní se směrem vláken síta nebo úhlem menším než  $10^\circ$ , tak minimální šířka pořízené čáry nám naroste z původních  $70\mu\text{m}$  na  $200\mu\text{m}$ . Z experimentů bylo zjištěno, že ideální úhel natočení je  $22,5^\circ$ . Různé velikosti natočení jsou pro lepší představu vyobrazeny na

Obr. 13.

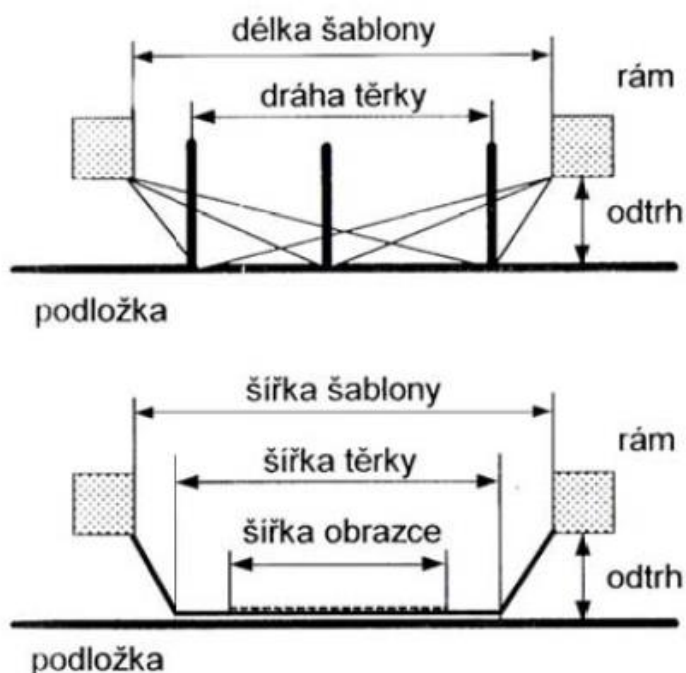
Obr. 13: Vliv úhlu síta a obrazce [3]



Neméně důležitým parametrem vrstvy je její tloušťka. Ta, jako vše ostatní, závisí na použité tkanině, její vzdálenosti od podložky, druhu pasty, tvrdosti, náklonu a rychlosti pohybu těrky a také struktuře a nasákavosti povrchu substrátu. Dominantní faktor z těchto uvedených skutečností můžeme přisoudit použité tkanině. To souvisí zejména s velikostí ok a průměru vlákna, které mají velký vliv na množství nanášené pasty.

Věrnost zobrazení na podložku nám určuje nejen napnutí síta, ale i vzdálenost síta od substrátu (odtrh). Po nanesení pasty na síto působíme těrkou na síto a to zapříčiní prohnutí síta k substrátu, kde se dotkne a ulpí pasta na podložce. Odtrh by měl být přesně nastavený, jelikož velký nebo malý odtrh nám velice znehodnocuje výsledný motiv. Prodloužení šablony v osách x a y závisí na výšce odtrhu, délce šablony, délce a šířce tištěného obrazce, šířce šablony, šířce těrky a délce posuvu těrky. Tyto parametry jsou zachyceny na Obr. 14. [3], [9]

Obr. 14: Schéma šablony při tisku [3]



### 1.7.1.5 Sítotiskové šablony

Při sítotisku využíváme dva základní principy šablony, jedním z nich je přímá maska na síťovině, nepřímá šablona se vytváří pomocí kovové nebo plastové fólie.

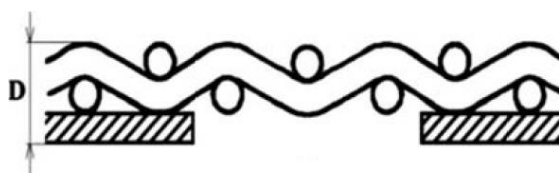
Přímá šablona (Obr. 15) vzniká nanesením fotocitlivé emulze do ok, do kterých je vtlačena. Následuje expozice přes masku, na které je vytvořen námi chtěný motiv. Posléze přichází na řadu osvit, při kterém se fotocitlivá emulze polymerizuje (vytvrzuje) a po oplachu již zůstávají prázdná oka jen tam, kde se později bude nanášet pasta. U přímých šablon se dosahuje životnosti až 100 tisíc tisků.

Obr. 15: Přímá šablona [2]



Nepřímá šablona (Obr. 16) je vytvořena pomocí plastové nebo kovové fólie, která však není v první fázi přímo spjata se sítím, ale při samotném sítotisku je se sítím již pevně spojena. Nepřímé masky mohou být jako světlocitlivé emulze nanesené na plastovém podkladu (jež se po exponování a spojení se sítím sejme) nebo můžeme použít kovovou fólii, kterou na síto nalepíme. Pokud použijeme kovovou fólii, tak motiv se vytváří pomocí laseru nebo též leptáním. Její nevýhodou je větší pracnost, ale na druhou stranu pomocí těchto šablon dosahuje vysokého rozlišení až desítek  $\mu\text{m}$ . [1], [3]

Obr. 16: Nepřímá šablona [2]



### 1.7.1.6 Těrka

Těrka, jak zde již bylo zmíněno, slouží k roztírání a vtlačování pasty skrz síto na substrát. Skládá se z desky, na níž je připevněno ostří, které se pohybuje po sítu či šabloně. Ostří se používá buď z polyuretanu nebo kovové z kvalitní oceli. Polyuretanové ostří se vyrábí v různých stupních tvrdosti podle toho jak jemný motiv potřebujeme vytvořit. Čím jemnější motiv je zapotřebí, tím musíme využít tvrdší těrku. Tvrdost těrky má také vliv na životnost síta či šablony. Doporučený úhel ostří těrky je v rozmezí  $45^\circ$  až  $60^\circ$  a postupem času se tento úhel mění, a tak je jednou za čas potřeba jej znovu naostrit. Nevýhodou polyuretanových terek je, že nabírají pastu z otvorů, a proto se nehodí pro šablony s velkými otvory. Tímto problémem netrpí těrky kovové, které dokáží vytvořit velmi rovnou vrstvu tisku. Pro ostří kovových terek se využívá úhlu  $60^\circ$ , který výrazně napomáhá ideálnímu odvalování pasty před těrku. Jejich nevýhodou je cena a, stejně jako u velmi tvrdých polyuretanových terek, rychlejší opotřebovávání síta či šablony. U automatického sítotisku můžeme nastavit rychlost těrky, která se pohybuje v řádu desítek až stovek  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Rychlost těrky musí být natolik pomalá, aby pasta, kterou před sebou hrne, stačila zaplnit celý motiv. Dalším nastavovaným parametrem je tlak, který musí být natolik velký, aby u sítotisku dokázal prohnout síto o odtrh. Používaná síla na těrku je většinou v rozmezí od 8,8 N do 11 N. U povrchové montáže, při použití pájecích past, se využívá referenční hodnoty 10 N/50 mm délky těrky. [3]

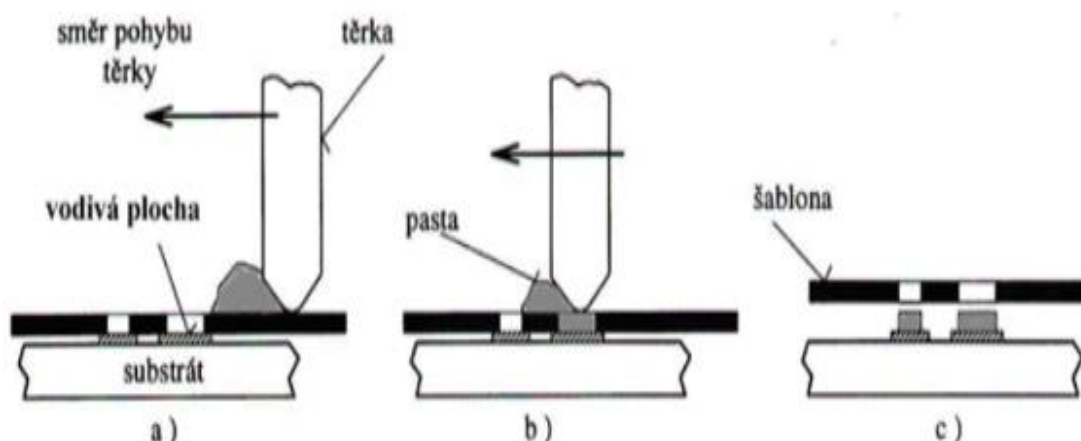
### 1.7.2 Šablonový tisk

Šablonový tisk se ve své podstatě neliší od sítotisku. Hlavním rozdílem, který nastává u těchto dvou metod, je v použité šabloně. U šablonového tisku je motiv vytvořen pomocí leptání nebo za pomoci laseru do planžety nebo fólie. Tato šablona se přímo přikládá na substrát, a tím pádem má nulový odtrh. Po nanesení pasty na šablonu pomocí těrky se mechanickým pohybem oddělí šablona od substrátu (viz. Obr. 17). Odtrh musí být tak rychlý, aby se pasta dobře oddělila a motiv zůstal dostatečně ostrý. Výsledná tloušťka vrstvy závisí na použité tloušťce planžety. Výhodou této šablony je rozměrová stabilita a přesnost tisku. Za pomoci této metody můžeme nanášet velké uzavřené plochy, nehodí se však pro složité obrazce nebo dlouhé čáry. Z těchto důvodů se šablonový tisk používá pro vytváření kontaktních

plošek a k nanášení pájecích past. Technika se vesměs tedy neliší od sítotisku, a proto se velmi často dají použít stroje, které se využívají při sítotisku. [1]

Obr. 17: Postup nanášení pasty na substrát pomocí šablonového tisku

a) stav před tiskem; b) tisk pohybem těrky; c) konečný stav po tisku [2]



### 1.7.2.1 Šablony pro šablonový tisk

Mezi materiály, které se používají pro šablony, můžeme zařadit zejména mosaz, ocel, měď, molybden a stále častěji i plast. Množství pasty, které použijeme pro daný motiv, závisí nejen na tloušťce šablony, ale také na velikosti volné plochy. Množství nanesené pasty velmi výrazně ovlivňuje jak elektrické, tak i mechanické vlastnosti dané vrstvy. Tloušťka nanesené vrstvy  $t$ , nezávisí pouze na tloušťce šablony, ale závisí i na rozměrech použitého motivu. Zásadním kritériem je minimální rozměr volné plochy  $X_{\min}$ , která musí být minimálně tak velká jako 0,66 rozměru tloušťky šablony  $t$ . Tento požadavek můžeme vyjádřit následujícím vzorcem, který nám udává takzvaný „Area ratio“.

$$x_{\min} : t \geq t : 1,5 \quad (8)$$

Pro přesnější vyhodnocení můžeme psát:

$$Area\ ratio = \frac{l \times w}{2 \times (l \times t) + 2 \times (w \times t)} \quad (9)$$

Popřípadě pokud máme kruhový otvor, tak pak platí:

$$Area\ ratio = \frac{\pi r^2}{2\pi r t} = \frac{r}{2t} \quad (10)$$

Jednou z možností jak vytvořit šablonu je chemické odleptáním plechu z nerezové oceli, kdy se na plech z obou stran nanáší obraz z fotorezistů, který chrání místa, jež nemají být odleptána. Následuje vytvrzení fotorezistu a dalším krokem pokračujeme v chemickém leptání v FeCl lázni. Po tomto kroku přichází na řadu elektrické leštění povrchu a hran. Tento proces je

nutný, jelikož hrany ve svislém směru nejsou ideálně rovné. Kvůli zarovnání hran musíme s tímto nežádoucím jevem počítat a při návrhu šablony uvažovat, že otvor se po zarovnání zvětší. Při chemickém leptání se dosahuje přesnosti až  $\pm 25 \mu\text{m}$ . Chemické leptání je velmi levné a časově nenáročné.

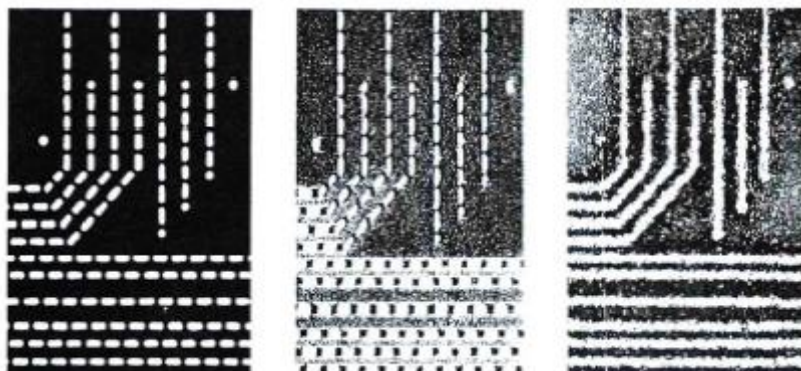
Další technikou pro tvorbu šablony je použití úzkého paprsku laseru, který má kruhovitý tvar. Pomocí této metody dosahujeme přesnosti až  $\pm 10 \mu\text{m}$ . Pokud použijeme ještě elektrické leštění vnitřních hran, můžeme přesnost vylepšit až na  $\pm 2 \mu\text{m}$ . Laser nám vytváří na desce lehce kónický profil otvoru. Paprskem se míří na desku ze spodu a výsledný tvar otvoru nám lehce napomáhá při pozdějším nanášení pasty. Toto je nejvíce patrné zlepšení u velmi úzkých motivů. Oproti chemickému leptání je přesnost motivů vyšší, ale cena laserového řezání je také mnohem vyšší.

Zajímavá technika pro tvorbu šablon je za pomoci galvanoplastiky. Tuto metodu využíváme hlavně pro šablony s velmi jemnými strukturami. Tento proces využívá aditivního nanášení niklu na pomocnou měděnou vrstvu. Cu vrstva nese fotorezistivní motiv, který je následně osvětlen UV světlem přes masku, která skýtá požadovaný motiv. Na takto vytvořený motiv za pomoci elektrogalvanického procesu nanášíme vrstvy niklu. Tento proces probíhá až do doby, kdy je vrstva dostatečně tlustá. Při dosažení této tloušťky je odstraněn fotorezist a vytvořená niklová vrstva se oddělí od pomocné měděné části. Výhodou této metody jsou velmi hladké stěny a také ostré okraje, které dosedají na podložku. Oproti chemickému leptání je sice tato metoda dražší, ale na druhou stranu je několikanásobně levnější než je metoda využívající laserové řezání. [1]

### 1.7.3 Micro-Screen

Tato metoda spadá pod techniku šablonového tisku a byla vyvinuta speciálně pro mikroelektronické a mikrovlnné obvody s vysokým rozlišením. U této technologie dosahujeme vysokého rozlišení čar a mezer a to až  $50 \mu\text{m}$ , což nám velmi redukuje potřebu velkého obvodu či vícevrstvých struktur. Metoda  $\mu$ -Screen využívá jako šablonu nerezovou fólii, do které se za pomoci mikroleptání vytvářejí řady otvorů, generovaných CAD systémem. Na spodní straně šablony je nanášena organická těsnicí vrstva. Tato vrstva umožňuje pastě téci po přesně daných plochách a zatékat tak do správných otvorů (viz. Obr. 18). Výhodou této techniky je, že je kompatibilní se sítotiskovými zařízeními a i při vysokém rozlišení si zanechává velmi ostré ohraničení. [3]

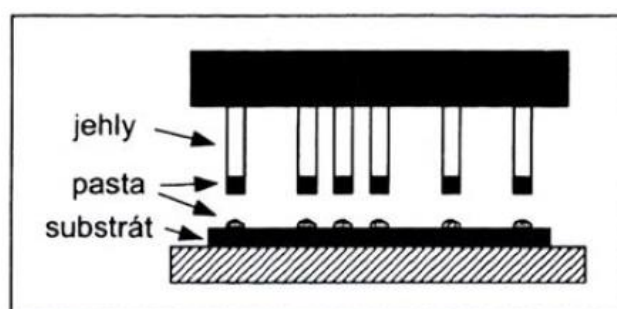
Obr. 18:  $\mu$ -Screen - vlevo nerezová fólie, uprostřed těsnící vrstva, vpravo výsledný obrazec [3]



### 1.7.4 Dispensing

U této metody vytváříme tlustovrstvou strukturu nanesením pasty na substrát za pomoci dotyku nebo vytlačení ze zásobníku (viz. Obr. 19). K tomuto procesu slouží duté nebo plné jehly. U jednoduššího dispensingu využíváme plné jehly různých tvarů. Prvním krokem se jehla ponoří do pasty, kde se uchytí příslušná pasta. Poté se jehla přesune nad substrát, kde má být vytvořený motiv, a dotkne se podložky. Tím, jak se jehla dotkne substrátu, skápne pasta na podložku. Výsledná vrstva závisí na viskozitě pasty, tvaru jehly a hloubce jejího ponoření při nabírání pasty. Tato metoda se využívá pro méně náročné aplikace, jelikož rychlost ani přesnost není příliš vysoká. Pro zrychlení nanášení se dá použít vícejehlové pole, čímž se dá najednou osadit celá deska.

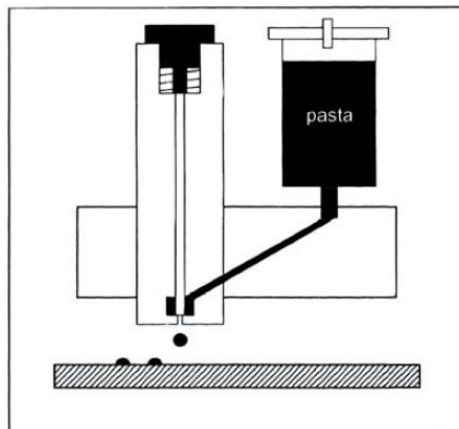
Obr. 19: Dispensing plnou jehlou [3]



Více využívaným typem dispensingu je za použití duté jehly, u které si předem stanovíme přesné množství vytlačované pasty. U tohoto použití je kromě viskozity velmi důležitá i vzdálenost konce jehly od podložky. Pro dnešní aplikace využíváme zásobník ve tvaru injekční stříkačky. Jehla se přesouvá programově řízeným mechanismem na určené místo, kde se příslušné množství pasty vytlačí. Pro vytlačování se využívá vzduchová pístová pumpa nebo píst se šroubovým posuvem. Pro urychlení procesu se využívá zvýšení počtu současně pracujících hlav nebo zvýšení rychlosti nanášení.

Pro urychlení nanášení pasty na podložku byl vyvinut bezkontaktní dispensing (Obr. 20). Oproti předešlým metodám je zde výhoda v eliminaci jehel a také v konstantní výšce, z které se nanáší pasta. Další výhodou je, že v komoře můžeme temperovat pastu a tím řídit její viskozitu. Pro zvýšení naneseného množství je zapotřebí použít více dávek vypouštěných na jeden bod. Počet dávek se obvykle pohybuje v rozmezí 1 – 5. Jednohlavé poloautomatické systémy pracují rychlostí 10 až 15 tisíc bodů za hodinu, a pokud využijeme automatickou bezkontaktní verzi, tak dosahujeme rychlosti až 140 tisíc bodů za hodinu. [3]

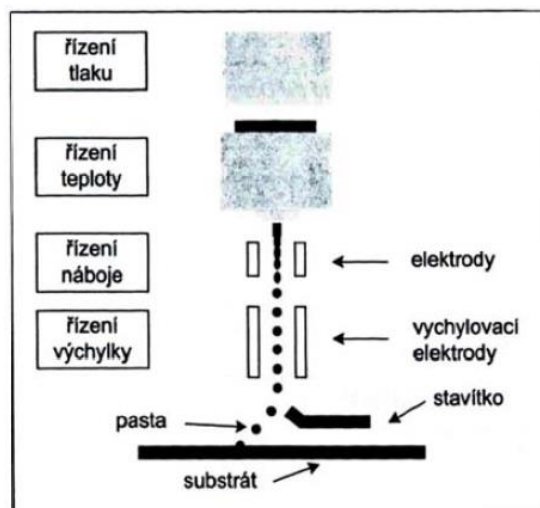
Obr. 20: Bezkontaktní dispensing [3]



### 1.7.5 Jetting

Jako poslední variantu nanášení pasty na substrát, kterou zde uvedu, je takzvaný jetting. Jedná se o vylepšenou verzi předešlé techniky. Vylepšení spočívá v tom, že dokážeme řídit let kapky z dispenseru pomocí elektrického pole, jak je naznačeno na Obr. 21. Mezi výhody této techniky patří její rychlost, přesnost a také to, že dokážeme nanášet velmi malé plošky. Těto výhody se využívá především při nanášení pájky na kontakty flip-chipů a věcí tomu podobných.

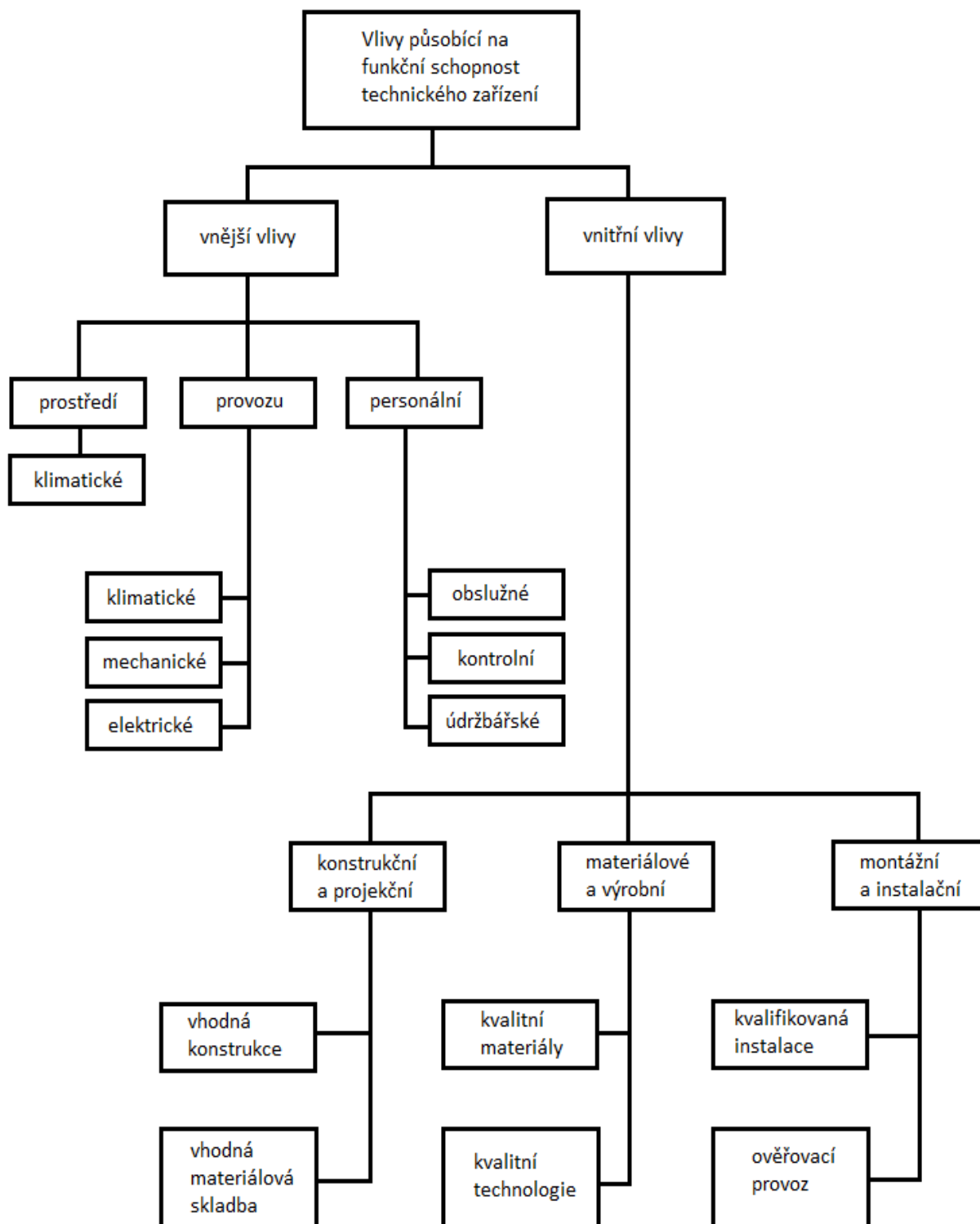
Obr. 21: Princip jettingu [3]



## 2 Degradční působení provozního prostředí

Na každé technické zařízení a jeho funkčnost působí několik vlivů, které můžeme nejjednodušeji rozdělit na dva základní typy, a to na vnitřní a vnější vlivy.

Obr. 22: Vlivy působící na funkční schopnost zařízení [13]





Do vnitřních vlivů, které ovlivňují funkčnost výrobku, můžeme zařadit všechny faktory, které se jakkoliv podílejí na vzniku výrobku. Patří sem použité materiály, jejich skladba, konstrukce nebo samotný technologický postup, který byl použit. Zkušenost člověka, který tyto postupy zhotovuje, a výběr materiálů, které se pro danou konstrukci použijí, velmi úzce souvisejí s konečnou kvalitou a odolností daného výrobku. Pokud tyto zásady budou dodrženy a bude dělaná mezioperační kontrola, může se daný výrobek použít i do nejnáročnějších prostředí.

Od zhotovení výrobku působí na tento produkt takzvané vnější vlivy. Jsou to například vlivy působící při skladování, přepravě a instalaci výrobku. Do skupiny vnějších vlivů zařazujeme takzvané provozní prostředí. Do této skupiny zapadají nejen klimatické podmínky působící na výrobek, ale i všechny činitele, které mají původ ve vlastní činnosti zařízení. Provozní prostředí působí na elektrické zařízení po celou dobu jeho života.

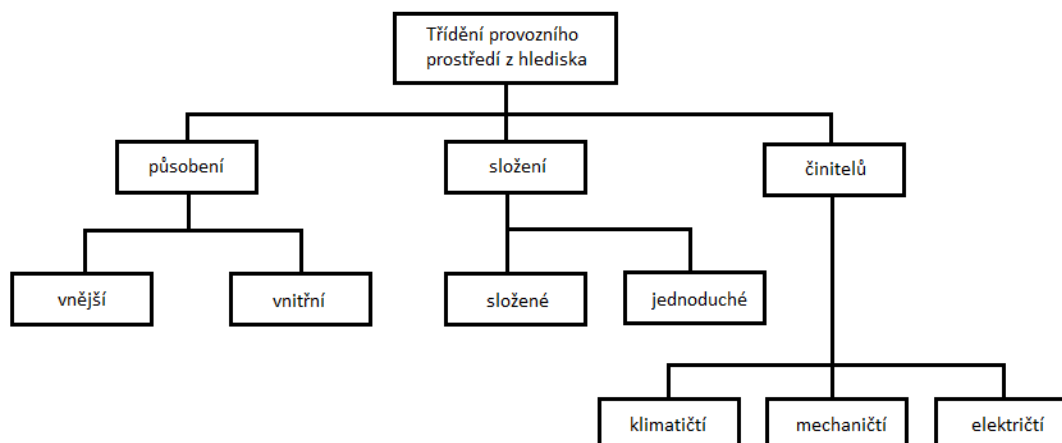
## **2.1 Třídění provozního prostředí**

Jedním způsobem, jak lze provozní prostředí rozdělit, je systém skládající se ze dvou podsystémů, tj. vnější a vnitřní prostředí.

Vnější prostředí charakterizujeme tím, že nezávisí na daném zařízení a lze ho popsat různými charakteristikami jako je teplota, množství prachu nebo vlhkost. Typickým příkladem může být venkovní klima, ale též klima uvnitř velkých prostor. Pokud pohlédneme na vnitřní prostředí, musíme brát v úvahu též vnější prostředí, které se podílí na jeho vzniku. Vnitřním prostředím takto popsaném rozumíme prostředí v nejbližším okolí výrobku. Uvnitř samotného výrobku označujeme prostředí jako mikroklima. Vnitřní klima závisí na konstrukci a technologii zařízení a tím pádem je velmi specifické. Vnitřní prostředí je na rozdíl od vnějšího vždy vázáno na zařízení a není nikdy identické s vnějším prostředím.

Dále můžeme prostředí dělit na jednoduché a složené. U jednoduchého prostředí působí jen malé množství přesně definovaných činitelů a může to být například klimatizovaný prostor, který je chráněn před vnějšími vlivy. Více se vyskytujícím provozním prostředím je složené prostředí. Jako příklad můžeme uvést venkovní prostranství, na které působí různé činitele vnějšího prostředí.

Obr. 23: Třídění provozního prostředí [13]



## 2.2 Činitelé provozního prostředí

Základní činitelé provozního prostředí s degradačními projevy jsou vyobrazeny v následující tabulce. Jako faktory provozního prostředí označujeme takové složky, které mají vliv na zhoršení vlastností zařízení.

Tab. 3: Základní činitelé provozního prostředí a jejich degradační projevy [13]

Činitel prostředí	Základní degradační projev	Typické důsledky degradace
vysoká teplota	strukturální změny, chemické reakce, sublimace, změny viskozity, odpařování, dilatace	- změna elektrických vlastností, - zvýšené mechanické tlaky, - ztráta lubrikačních vlastností
nízká teplota	křehnutí, ztráta mechanické pevnosti smršťování, změna viskozity	- ztráta lubrikačních vlastností, - ztráta mechanické vlastnosti, - zhoršení mazacích vlastností
změna teploty	mechanické pnutí, diferenční zahřívání	- ztráta mechanických vlastností, - vznik netěsností
vysoká relativní vlhkost	sorpční děje, bobtnání, chemické reakce	- změna dielektrických vlastností, - ztráta mechanické vlastnosti
nízká relativní vlhkost	vysoušení, křehnutí, smršťování, zvýšená abraze	- ztráta mechanické pevnosti, - změna elektrických vlastností
změna vlhkosti	chemické reakce, adsorpce vodní páry	- změna elektrických povrchových vlastností, - změna rozměrů

vysoký tlak	imploze	- strukturální změny, - snížení těsnosti
nízký tlak	exploze, zhoršené chlazení, přehřívání	- poškození těsnosti, - snížení dielektrické pevnosti vzduchu
sluneční záření	chemické a fyzikálně chemické reakce, křehnutí, zahřívání	- změna mechanických vlastností, - změna elektrických vlastností, - odbarvení materiálů
plynné exhalace	chemické reakce, koroze, elektrolýza	- poškození povrchu, - zeslabení struktury, - ztráta mechanických a elektrických vlastností
prach, písek	abraze, tepelná izolace	- zvýšený otěr, - přehřívání
děšť	adsorpce, tepelný ráz, eroze, koroze	- změna elektrických vlastností, - zhoršení těsnosti
kroupy	mechanická deformace, tepelný ráz, eroze	- porušení povrchové struktury
sníh, led	adsorpce, tepelný ráz, mechanická deformace	- změna elektrických charakteristik, - ztráta mechanických vlastností
mikroorganismy	koroze, akumulování vlhkosti	- změna elektrických povrchových vlastností, - rozklad materiálu, - zkratky
zrychlení	mechanické napětí	- strukturální změny, - ztráta mechanické pevnosti
chvění, vibrace, akustický hluk	mechanické napětí, únava	- ztráta mechanické pevnosti, - strukturální změny, - zvýšený otěr
elektrické napětí	elektrické stárnutí	- průraz izolace
elektrický proud	ohřev	- zvýšené mechanické tlaky, - změna elektrických vlastností

Většina činitelů provozního prostředí uvedených výše mají společné atributy a až na výjimky se dají zařadit do jedné ze tří následujících skupin.

Jako první skupinu můžeme uvést **činitele klimatického původu**.

Tato skupina se dále dělí na dvě podskupiny, a to na základní klimatické činitele a na doplňkové klimatické činitele. Do první podskupiny zařazujeme tyto činitele:

- Teplota vzduchu
- Vlhkost vzduchu
- Tlak vzduchu

Tito činitelé hrají největší roli pro tvorbu vnitřního prostředí, ale jsou též zásadními a základními prvky pro prostředí vnější. Do třídy doplňkových klimatických činitelů poté zařazujeme:

- Plynné znečištění ovzduší (např. SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, NO<sub>x</sub> a další)
- Pevné nečistoty ovzduší (např. prach, popílek, saze, písek)
- Sluneční záření
- Atmosférické srážky (např. déšť, sníh, námraza)
- Mikroorganismy (např. plísně a bakterie)
- Makroorganismy (např. termiti, myši, hadi atp.)
- Vítr, bouře, cyklony

Některé z výše uvedených činitelů mohou být pouze uvedeny jako činitele vnějšího prostředí (déšť, sluneční záření atp.). Jiné se dají zařadit jak do vnitřního prostředí, tak i do vnějšího prostředí. Vnější prostředí je např. zdrojem plísňových spór, ve vnitřním prostředí se vytváří plísňový porost. Naopak některé doplňkové činitele mohou být jen produktem vnitřního prostředí.

Jako druhou skupinu můžeme uvést **činitele mechanického původu**.

U této skupiny je třídění velmi problematické. Elektrické zařízení je namáháno různými způsoby a je mechanicky namáháno ještě dříve, než je uvedeno do provozu. Ať se jedná o balení zařízení nebo jeho přepravu. U těchto aspektů nejčastěji rozlišujeme tato namáhání:

- Chvění
- Zrychlení
- Pády, nárazy, překlápění

Pro samotný provoz nebo ještě dříve instalaci uvažujeme převážně tyto namáhání, která převládají:

- Chvění
- Vibrace
- Akustický hluk

Mechanické namáhání můžeme rozlišovat na prvotní a na druhotné. Prvotní namáhání je častější a je vyvoláno samotným provozem výrobku. Pro druhotné namáhání platí, že jsou to vlivy vnější, jako např. vliv větru nebo seismická aktivita. Často se může vyskytnou situace, kdy prvotní mechanické namáhání je ovlivněno druhotným mechanickým namáháním. Například interference chvění stroje a základů.

Třetí skupinu označujeme jako *činitele elektrického původu*.

Každé elektrické zařízení je během svého funkčního života namáháno jmenovitým elektrickým namáháním. Do této skupiny se zařazuje:

- Elektrické napětí
- Elektrický proud
- Elektrické a magnetické pole

Elektrické napětí můžeme přirovnat k prvotnímu mechanickému namáhání. Působení elektrického napětí připomíná tepelné nebo některé plynné namáhání. Oproti tomu elektrický proud nebo elektrické pole zařazujeme spíše do znehodnocení druhotného charakteru a jejich účinky se dají přirovnat k působení vysoké teploty. Toto namáhání může způsobit zesílení určitých klimatických činitelů, a může tak ovlivnit např. sedimentaci pevných látek. Změny magnetického pole se nejčastěji podílejí na mechanickém namáhání.

Ne vždy je dosaženo jmenovitého elektrického namáhání. Mohlo by se zdát, že nižší namáhání bude mít vždy příznivé účinky z hlediska zpomalení degradačních procesů, ale není tomu tak vždy. Například při zvýšené vlhkosti, motor při chodu naprázdno, je namáhání větší než při zatížení.

Dále rozlišujeme elektrické namáhání, které je vyšší nebo nižší než jmenovité a nazýváme ho mimořádné elektrické namáhání. Do této skupiny spadá:

- Podpětí, přepětí
- Zkrat, elektrický výboj
- Bludné proudy, zavlčené napětí

Elektrické namáhání vytváří velmi často s některými klimatickými činiteli namáhání specifického typu. Pro tuto různorodost nelze elektrické namáhání, stejně jako mechanické, jednoznačně klasifikovat.

## 2.3 Klasifikace činitelů provozního prostředí

Každý činitel provozního prostředí působí na zařízení trochu jinak, ale dopad těchto činitelů můžeme rozlišovat na dopad přímý a nepřímý. Přímí činitelé se podílejí bezprostředně na znehodnocení zařízení. Může to být např. teplota vzduchu nebo obsah vodní páry ve vzduchu. Druhým typem jsou nepřímí činitelé provozního prostředí a jsou to takoví činitelé, jejichž dopad závisí na intenzitě nebo výskytu přímého činitele.

Na zařízení působí většinou hned několik různých činitelů prostředí, ale jen malé množství z nich má za následek podstatné znehodnocení. Činitele, které jsou schopny vyvolat podstatné znehodnocení, označujeme jako rozhodující degradační činitele provozního prostředí a ve většině případů jich nebývá více než dva. Pro různé skupiny materiálů existují různé rozhodující degradační činitelé. Jako kritickou velikost degradačního činitele označujeme takovou velikost, která znehodnocuje zařízení.

Všechny činitele provozního prostředí můžeme popsat zejména dobou působení a intenzitou. Pokud se na danou problematiku podíváme z hlediska degradace, tak rozlišujeme prostředí podle kritické:

- Extrémní (velké nebo malé) intenzity
- Změny intenzity
- Četnosti výskytu
- Doby trvání

Kritická extrémní intenzita a kritická změna intenzity probíhají v krátkém čase. Může se jednat například o vzrůst relativní vlhkosti vzduchu po dešti. Kritická četnost a kritické trvání představují naopak přetržitou, v prvním případě, či nepřetržitou, v druhém případě, intenzitu provozního činitele, která však nedosahuje extrémních hodnot.

Dalším parametrem je variabilita činitele provozního prostředí. Malá variabilita je označení pro změnu intenzity, která se mění, ale neklesne pod kritickou hodnotu. O velké variabilitě hovoříme tehdy, když intenzita se mění z nadkritické do hodnoty podkritické a naopak. U malé variability můžeme hovořit o kolísavém působení a u velké variability o přerušovaném působení činitele provozního prostředí.

Přerušované působení činitele se může projevit pomalejším znehodnocováním než je tomu u nepřerušované kritické intenzitě. Tuto skutečnost můžeme tvrdit jen tehdy, dochází-li k "zotavení" poškozovaného materiálu. Pokud však toto znehodnocení nezávisí na době působení degradačního činitele, tak tento fakt neplatí.

Může se také stát, že zároveň působí více rozhodujících degradačních činitelů. Jejich vzájemný dopad závisí na fyzikální, chemické nebo biologické povaze. Nejméně často se stává,

že působící činitele se navzájem neovlivňují, nebo se také může stát, že vzájemné působení účinek zeslabuje. Častější případ, který nastane, je, že tyto účinky se navzájem zesilují.

## 2.4 Klasifikace dějů znehodnocení

Degradace je souhrn změn vlastností materiálu, ke kterému dochází na základě fyzikálních a fyzikálně-chemických dějů v materiálu vlivem degradačních činitelů. Velikost a rozsah poškození závisí na průběhu a charakteru těchto dějů. S tímto procesem souvisí kinetika degradace, která udává rychlost tohoto procesu. Mechanismus degradace s ohledem na jeho podstatu rozčleňujeme do následujících bodů:

- **Stárnutí** - proces chemických změn vnitřní struktury materiálu projevující se postupnou změnou vnitřních nebo vnějších parametrů
- **Únava** - proces fyzikálních změn vnitřní struktury projevující se postupnou změnou vnitřních parametrů
- **Opotřebení** - proces fyzikálních a chemických změn povrchové struktury projevující se postupnou změnou vnějších parametrů

Dle délky působení zařazujeme do krátkodobých degradačních dějů takové děje, které trvají nanejvýš několik dní. Dopad těchto dějů je náhlé znehodnocení. Pokud degradační děj trvá měsíce a roky, tak ho označujeme jako dlouhodobý degradační děj. Je to typické pro postupné znehodnocení.

Po působení degradačního děje může nastat několik druhů znehodnocení. První z nich je nevratné znehodnocení. To znamená, že i po odeznění degradačních vlivů se vlastnosti nevrátí do svých původních hodnot. Další možností je přechodné znehodnocení. To znamená, že po spadnutí hodnoty degradačního činitele pod kritickou velikost, znehodnocení pomine. Poslední možností je vratné znehodnocení. Jakmile přestane působit degradační namáhání, tak vlastnosti materiálu se vrátí zcela nebo částečně do původních hodnot.

## 2.5 Klasifikace provozního namáhání

Dnes tvoří základ pro klasifikační systém teplota a vlhkost v jednotlivých oblastech zemského povrchu. Je to přístup založený na jednotlivých degradačních mechanismech. Pro klasifikaci vnějšího prostředí vycházím z mezinárodního dokumentu IEC 721-2-1 a je zpracován v ČSN 03 8900 [20]. Na základě tohoto dokumentu dělíme venkovní prostředí do klimatických oblastí uvedených v následující tabulce.

Tab. 4: Základní klasifikace podmínek vnějšího prostředí [13]

Klimatická oblast	Označení oblasti
velmi studená	EC
studená	C
chladná	CT
mírná	WT
teplá suchá	WDr
horká suchá	MWDr
velmi horká suchá	EWDr
horká vlhká	Wda
horká vlhká vyrovnaná	WDaE

Každá klimatická oblast je charakterizována:

- Extrémními hodnotami denních průměrů teploty a vlhkosti
- Extrémními hodnotami měsíčních průměrů teploty a vlhkosti
- Extrémními hodnotami ročních průměrů teploty a vlhkosti
- Absolutními extrémními hodnotami teploty a vlhkosti vzduchu

Každá klimatická oblast má ještě příslušný stavový diagram vlhkého vzduchu. Pro normální atmosférický tlak diagram vyjadřuje vztah mezi teplotou a vlhkostí vzduchu. Z tohoto diagramu si můžeme odvodit například absolutní vlhkost vzduchu nebo také rosný bod při poklesu teploty.

Tento systém ještě navíc zavádí navíc sdružený typ klimatu (viz. Tab. 5). První oblast takzvaná úzká, zahrnuje mírné pásmo. Do oblasti střední spadá chladné, mírné teplé suché a horké suché pásmo. Třetí skupinou, je široká oblast, kam patří vše krom velmi studeného a velmi horkého suchého klimatu. Poslední položkou, je pak skupina světová, kam spadají všechny zmíněné klimatické oblasti.

Tab. 5: Sdružený typ klimatu [13]

Sdružená klimatická oblast	označení oblasti
úzká	R
střední	M
široká	G
světová	WW



Klasifikace všech skupin činitelů provozního prostředí a stanovení stupňů jejich přísnosti obsahuje ČSN IEC 721-3 0 až 7 [21]. Tento standart rozděluje provozní prostředí do sedmi tříd:

- Skladování (1)
- Přeprava (2)
- Stacionární použití chráněné proti povětrnostním vlivům (3)
- Stacionární použití nechráněné proti povětrnostním vlivům (4)
- Pozemní vozidla (5)
- Lodní prostředí (6)
- Přenosné a nestacionární použití (7)

Pro každou třídu jsou definovány příslušné podmínky:

- Klimatické (K)
- Zvláštní klimatické (Z)
- Biologické (B)
- Mechanické (N)
- Chemicky aktivní látky (C)
- Mechanicky aktivní látky (S)

A každé podmínky mohou mít několik tříd přísnosti.

Základní literatura k problematice znehodnocování technických výrobků [13], [15].

## 3 Znehodnocování materiálu

Tato kapitola se bude zabývat převážně znehodnocujícími ději, kterými jsem se snažil vystavit testovací vzorky v příslušných komorách. Mimo tyto děje se dají popsat velká množství dalších mechanismů, které mohou nepříznivě ovlivnit kvalitu materiálu. Mezi tato znehodnocení můžeme např. zařadit fotochemické, elektrické nebo znehodnocení prachem či biodeterioraci.

### 3.1 Vlhkostní znehodnocování

Mezi nejvíce závažné formy znehodnocení řadíme vlhkostní znehodnocování. K navlhání dochází vždy u materiálu, který se nachází ve styku s vlhkým vzduchem. Jedná se o jev povrchový (povrch materiálu je pokryt vrstvou molekuly vody), ale též sem řadíme jev vnitřní, kdy se obsah vody postupně dostává do vnitřku materiálu. Prvnímu případu říkáme adsorpce, druhému posléze absorpce. Obecně tyto jevy můžeme nazývat sorpce a platí nejen pro vlhkost, ale patří sem i sorpce různých plynů a par. Látku, do které pára nebo plyn vnikají, nazýváme adsorbent a adsorbovaný plyn se nazývá adsorbát. Mechanismus vlhkostního znehodnocování označujeme jako sorpční znehodnocování ve vlhkém vzduchu.

#### 3.1.1 Zákonitosti vlhkého vzduchu

Nejdříve je nutné si ujasnit příslušnou terminologii. Vlhkým vzduchem je nazývaná směs suchého vzduchu (neobsahuje molekuly vody) a vodní páry. Poté označujeme nasycený vlhký vzduch jako směs vzduchu s přehřátou vodní párou. Pro naše účely uvažujeme především tlak blízký k atmosférickému, kde tlak vodní páry je malý a tudíž se řídíme stavovou rovnicí ideálního plynu. Pro určení stavu vlhkého vzduchu si nejčastěji vystačíme s dvěma stavovými veličinami a to tlakem a teplotou. Do praxe zavádíme následující veličiny:

*Absolutní vlhkost vzduchu  $f$* , která je definována jako měrná hmotnost vodní páry:

$$f = \frac{M_p}{V} \quad (11)$$

Dosaďme-li ze stavové rovnice pro vodní páru:

$$p_p \cdot V = M_p \cdot R_p \cdot T \quad (12)$$

hodnotu  $V$ , můžeme absolutní vlhkost vyjádřit vztahem:

$$f = \frac{p_p}{R_p \cdot T} \quad (13)$$

Je-li vzduch nasycen vodní párou, je absolutní vlhkost maximální a značíme ji  $f''$ .

*Relativní vlhkost vzduchu*  $\varphi$  udává, do jaké míry je pára ve vzduchu nasycena. Definice říká, že je to podíl absolutní vlhkosti při dané teplotě k absolutní vlhkosti při nasyceném stavu:

$$\varphi = \frac{f}{f''} = \frac{R_p \cdot T \cdot p_p}{R_p \cdot T \cdot p_p''} = \frac{p_p}{p_p''} \quad (14)$$

což je poměr parciálního tlaku par obsažených ve vzduchu k tlaku par sytých při téže teplotě.

*Vodní obsah vzduchu*  $x$  udává, jaká hmotnost vodní páry  $M_p$  připadá na hmotnost suchého vzduchu  $M_{vz}$ :

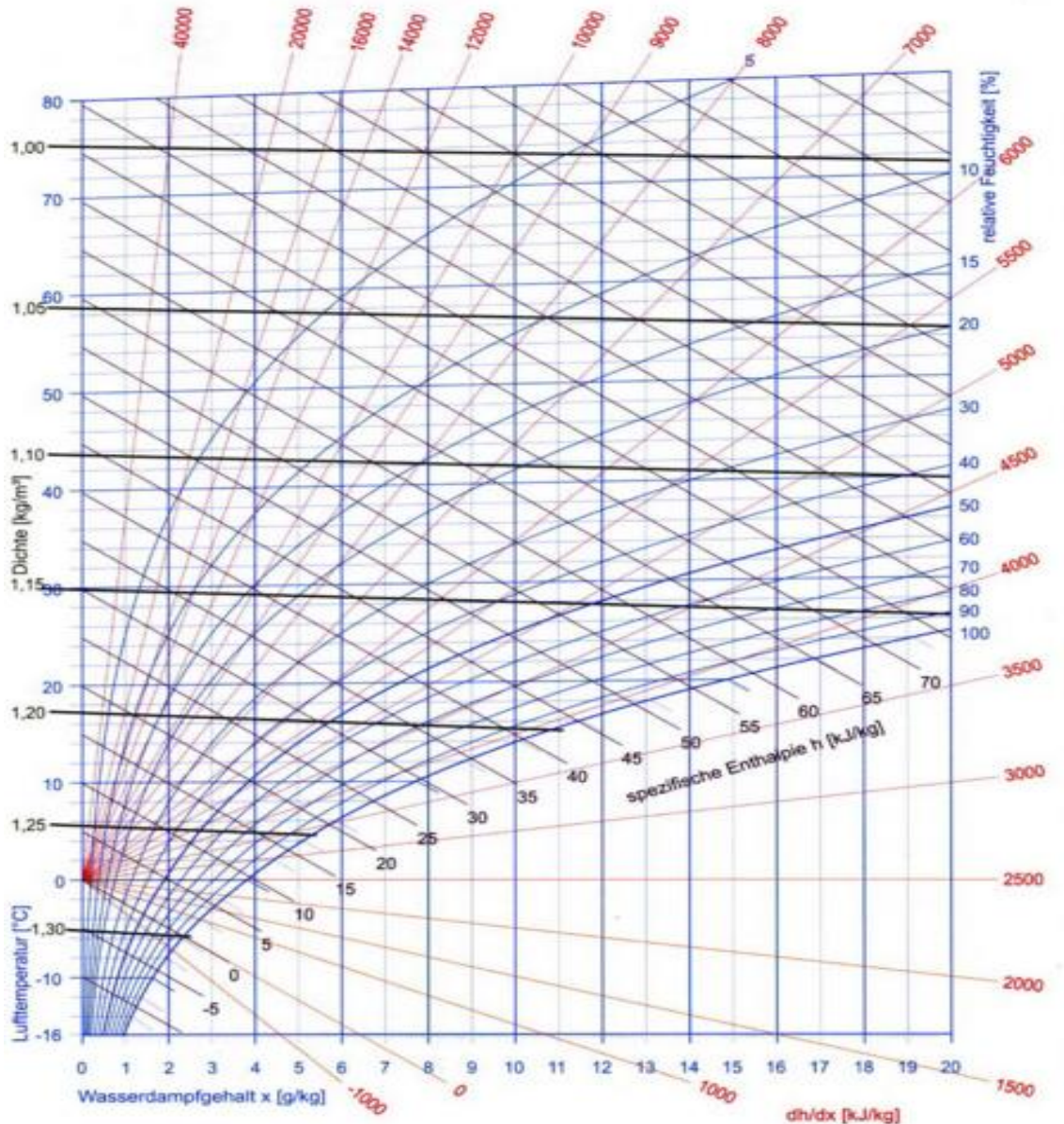
$$x = \frac{M_p}{M_{vz}} = \frac{R_{vz} \cdot p_p}{R_p \cdot p_{vz}} = 0,622 \cdot \frac{p_p}{p - p_p} = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_p''}{p - p_p''} \quad (15)$$

kde  $p_p$  je tlak vodní páry,  $p_{vz}$  tlak vzduchu a  $R_p$ ,  $R_{vz}$  jsou plynové konstanty vodní páry a vzduchu. Jejich podíl  $R_{vz}/R_p = 0,622$ .

*Teplota rosného bodu*  $t_r$  je teplota, při které jsou páry ve vzduchu právě syté.

*Tepelný obsah*  $i$  (entalpie) vlhkého vzduchu představuje množství tepla potřebného k izobarickému ohřátí 1 kg suchého vzduchu z 0 °C a množství tepla pro ohřátí  $m$  kg z 0 °C, její vypaření a přehřátí par na teplotou  $t$ . Abychom mohli jednoduše znázornit změnu stavu vzduchu, tak se často používá grafické vyjádření a nejčastěji se využívá Mollierův  $i - x$  diagram.

Obr. 24: Mollierův  $i - x$  diagram [19]



### 3.1.2 Mechanismus vlhkostního namáhání

Pokud se nemění množství vodní páry v prostředí, tak materiál v tomto prostředí dosáhne určitého množství vody a tento obsah vody bude nadále rovnovážný. Jaká bude rovnovážná hodnota, tak to záleží zejména na množství vodní páry v okolí, dále na teplotě a také na tom, jak je voda v látce vázaná. Tento způsob je závislý na fyzikálních a chemických vlastnostech materiálu. Voda se může vyskytnout v tuhé látce v několika druzích, např. jako: voda krystalická, osmotická, volná, rozpuštěná, kapilární a adsorbovaná. Největší vliv z degračního hlediska mají poslední dvě zmíněné formy. Vodu kapilární můžeme najít u jemně porézních látek, kde je vázaná v kapilárách, v mezních hranicích částic tuhé látky atp.

Voda adsorbovaná zase zůstává na povrchu látky vlivem povrchových sil. Adsorpce není výhradně na povrchu, ale může také vzniknout uvnitř tuhé látky, kde se vyskytují póry.

### 3.1.2.1 Kapilární kondenzace

Voda se vsakuje do porézních hmot, ve kterých zaplňuje kapilární prostory, smáčí tak stěny těchto kapilár a vytváří konkávní povrch. Pro zjednodušení si představme, že kapiláry jsou válcového typu o různých poloměrech. Čím budeme mít kapiláru užší, tím se bude vytvářet větší zakřivení povrchu kapaliny a tím je menší tlak páry, která je s kapalinou v rovnováze. Pro každý tlak páry odpovídá určitá křivost povrchu kapaliny. Poloměr zakřivení vychází z Thomsonova vztahu:

$$r = \frac{2 \cdot \sigma \cdot V}{R \cdot T \cdot \log(p/p_0) \cdot \cos \theta} \quad (16)$$

kde	$R$	je molární plynová konstanta,
	$\sigma$	je povrchové napětí,
	$V$	je objem,
	$T$	je termodynamická teplota,
	$p_0$	je tlak nasyceného stavu,
	$p$	je tlak.
	$\theta$	je úhel smáčení.

Pro tlak  $p$  bude platit, že kapiláry válcového typu s poloměrem menší než  $r$  vypočteného z předešlé rovnice budou zaplněny a kapiláry s poloměrem větším než je hodnota  $r$  budou naopak prázdné. Z toho plyne, že se zvyšujícím tlakem  $p$  se budou zaplňovat i větší kapiláry. Z toho vyplývá, že čím je větší stykový úhel, tím jsou podmínky pro kapilární kondenzaci menší.

Mezní hodnota pro kapilární navlhání je poloměr póru 107,7 nm, kdy se tlaky nad meniskem a rovinným povrchem prakticky vyrovnají. Póry s větším poloměrem se nazývají makropóry a lze je zaplnit již jen přímým stykem s kapalinou. Naopak pokud máme pór menší než je velikost molekuly vody, tak pór nazýváme mikropór. Tyto póry se zaplňují při adsorpci při nízkých tlacích.

Tab. 6: Snížení tlaku vodní páry nad meniskem v závislosti na poloměru kapiláry [13]

p/p <sub>0</sub>	r (nm)	p/p <sub>0</sub>	r (nm)
0,10	0,46	0,70	3,01
0,20	0,67	0,80	4,83
0,30	0,89	0,90	10,25
0,40	1,17	0,95	21,90
0,50	1,56	0,99	107,50
0,60	2,11	0,999	1077,00

Pomocí fyzikální adsorpce lze tedy vysvětlit problematiku kapilární kondenzace. Pro hodnoty nízkého tlaku dosahujeme zaplnění mikropórů a u přechodných pórů a makropórů se na stěnách kapilár začínají vytvářet adsorbované vrstvičky, které se postupně zvětšují. V dalším kroku (zvýšení tlaku) začínají vznikat menisky, které pozorujeme u přechodných pórů, a tak se začnou zaplňovat kapilární kondenzací.

### 3.1.2.2 Adsorpce vlhkosti

O adsorpčním znehodnocení mluvíme tehdy, když jevy s tímto spojené jsou podmíněně adsorpcí molekul vody na povrchu materiálu. O povrchu mluvíme i tehdy, pokud materiál obsahuje póry či kapiláry. U makromolekulárních látek nemůžeme mluvit o vnitřním povrchu v geometrickém smyslu slova, jelikož tyto materiály jsou souvisle vyplněny, a přesto u takovýchto materiálů dochází k adsorpci. Takovéto látky si lze spíše představit tak, že obsahují adsorpční body.

K adsorpci dochází na rozmezí tuhé látky a prostředí, které ho obklopuje. Síla, která drží stavební materiál pohromadě, existuje v několika formách. U krystalických látek jsou částice uspořádány v prostorové mřížce. Ta může mít trojí podobu: iontovou, homeopolární nebo molekulární.

První formou jsou iontové krystaly, pro které jsou stavebními kameny ionty, které jsou drženy silami elektrostatické povahy. U látek s homeopolární mřížkou jsou neutrální atomy vázány jednoduchými chemickými valenčními silami. U třetí skupiny s molekulární mřížkou jsou molekuly pravidelně uspořádány a jsou drženy van der Waalsovými přitažlivými silami. Tyto síly nepůsobí jen uvnitř materiálu, ale jejich síla zasahuje i nepatrně do prostoru, kde můžou přitáhnout molekuly plynu k povrchu. Tím je vysvětlena adsorpce vlhkosti tuhé látky.

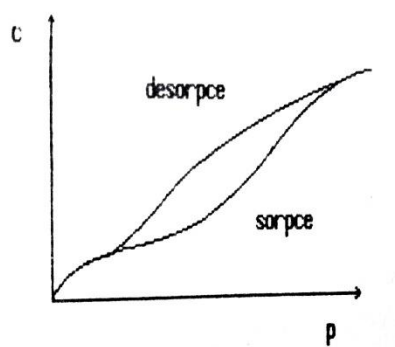
K adsorpci dochází u všech typů látek tuhé fáze, a to i u nekystalických makromolekulárních organických látek. Pokud máme polární makromolekulární organickou látku, tak u ní dochází k adsorpci molekul vody na hydrofilních skupinách, příčinou van der

Waalsových sil a vodíkových můstků. Naproti tomu u nepolárních makromolekulárních látek se dá mluvit jen o van der Waalsových silách mezi molekulami vody a molekulami polymeru. Jelikož u takovéto sorpce nemůžeme jednoznačně určit adsorpční místa, tak používáme pojem rozpouštění molekul vody v polymeru.

### 3.1.2.2.1 Sorpční hystereze

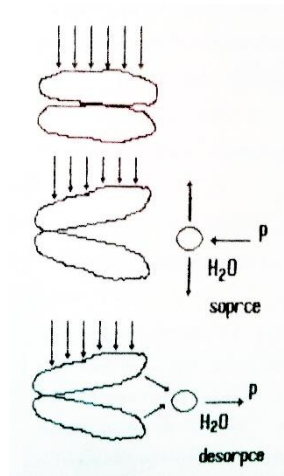
Pokud se začne snižovat tenze vodní páry, nastává děj opačný k adsorpci, a to desorpce vodní páry z povrchu. Jestliže porovnáme průběh adsorpční a desorpční křivky, zjistíme, že dochází k nesouhlasu sorbovaného množství (viz. Obr. 25).

Obr. 25: Hystereze u sorpčně-desorpční izotermy [13]



K tomuto poznatku neexistuje jednoznačná teorie. Jedna teorie tento jev spojuje s kapilární kondenzací, druhá vychází z předpokladu, že při příjmu sorbátu adsorbent bobtná. To má za následek trhání adsorbentu, které s projevím zvýšením sorpční plochy uvnitř adsorbentu. Následně je bobtnání omezeno elasticitou soudržností a je přibližně úměrné povrchovému tlaku. Síly, které měly za následek roztržení povrchu, jsou slabší než síly, které proti tomuto roztržení původně působily. Následuje zpětný chod, kdy se povrch uzavře po ustoupení sil, které toto způsobily, a začnou se opět uplatňovat povrchové síly.

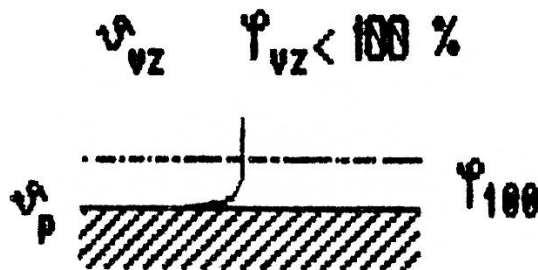
Obr. 26: Mechanismus bobtnání [13]



### 3.1.2.3 Transport kapalné vody k materiálu

Další případ nastává při velmi rychlé změně teploty okolí. Při tomto ději dochází k vyrovnání teploty okolí a povrchu materiálu v mezní vrstvě nad povrchem (Obr. 27). Tato vrstva se rychle nasytí vodní párou, a jelikož relativní vlhkost nemůže překročit 100 %, začne se voda srážet na povrchu ve formě zkondenzované vody.

Obr. 27: Kondenzace vody na povrchu [13]

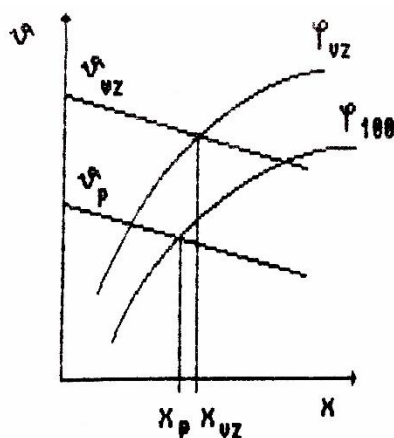


Množství vody, které se takto vysráží, nastiňuje Obr. 28. Ke stejnému ději dochází i ve vzduchu (na kondenzačních jádrech prachu, nečistotách apod.). Takto zkondenzovaná vodní pára může sedimentovat na povrchu a vytvářet zde vrstvy vody v kapalné fázi. Takto vzniklé množství vody na povrchu je podstatně větší než je tomu u sorpčních dějů, které zde byly zmíněny a tak je i vlhkostní znehodnocení materiálu značnější.



Obr. 28: Zkondenzované množství vodní páry na povrchu ochlazeném na teplotu rosného bodu

[13]



Základní literatura k problematice vlhkostního znehodnocování [13], [16].

## 3.2 Teplotní znehodnocování

Jedním z dalších významných vlivů na degradaci materiálu je teplotní znehodnocování. Teplota má vliv na vlastnosti materiálu ihned od jeho vzniku, přes technologické zpracování, a podílí se až do konce životnosti součástky. Teplota má jak krátkodobý, tak i dlouhodobý charakter působení. Pokud se jedná o krátkodobé namáhání, vliv na změny materiálu jsou většinou vratné, oproti tomu dlouhodobé namáhání má za následek vždy změny nevratné.

### 3.2.1 Degradace při krátkodobém působení teploty

Nejčastějším projevem krátkodobého působení teploty je kolísání teploty, což má dopad na rozměrové vlastnosti materiálu. Kolísáním teploty vzniká pnutí v materiálu, které může mít za následek různě velké trhliny a může dojít až k prasknutí materiálu. Pokud dochází ke střídání teploty, tak se může změnit krystalická struktura polymeru, a to má vliv nejen na mechanické vlastnosti, ale také na difuzi ozonu či kyslíku do polymeru, čímž je také ovlivněno stárnutí. Vyšší teplota též může mít za následek vytěkání některých složek polymerů, jako jsou různé stabilizátory nebo změkčovadla.

### 3.2.2 Degradace při dlouhodobém působení teploty

Významnější dopady na vlastnosti materiálu má dlouhodobé působení teploty, které vyvolává nevratné změny ve struktuře. Méně častým případem je nepřetržité působení vysoké teploty. Častějším jevem je řada po sobě jdoucích různě dlouhých časových úseků, při kterém se teplota působící na materiál mění. Pro zjišťování účinků vysoké teploty a matematický popis se

však nejvíce využívá dlouhodobé nepřetržité působení teploty, které může mít za následek změny fyzikální podstaty materiálu:

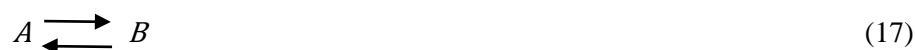
- změna hmotnosti (vysoušení),
- změna pružnosti, pevnosti,

nebo také chemické změny. Ke změnám chemického původu nedojde vždy působením vysoké teploty, ale dojde k nim tehdy, pokud jsou splněny dva základní předpoklady, a to: molekuly musí mít dostatečnou energii a musí být velká statistická pravděpodobnost střetu molekul v materiálu. Téma chemické reakce a jejího mechanismu popisuje reakční kinetika.

Podle reakční kinetiky se nám naskytuje možnost třídit reakce například dle fází. Jestliže reakce probíhá v jedné fázi, přisuzujeme jí název homogenní. Jiným typem je reakce, která probíhá na styku dvou fází, kterou pak nazýváme heterogenní. Homogenní chemické reakce jsou například reakce, které způsobují termooxidační stárnutí.

Z jiného hlediska můžeme chemické reakce dělit na reakce izolované a simultánní. Častější vyskytující se reakce v reálné soustavě je reakce simultánní. Tento druh reakcí můžeme následně rozdělit do třech základních typů:

Do první třídy zařazujeme reakce zvrtné. U těchto reakcí dochází zároveň s první reakcí i k reakci zpětného charakteru. Můžeme si to představit pomocí následujícího schématu:



Jinými slovy můžeme říci, že produkty probíhající reakce se opět rozloží na výchozí látku.

Do simultánní reakce patří též reakce bočné. Tímto procesem vznikají reakční produkty různé od původního materiálu. Pro názornost popisuje tento děj následující schéma:



Do boční reakce typicky zařazujeme termooxidační stárnutí.

Jako o poslední simultánní reakci mluvíme o reakci následné. Produkty výchozí reakce reagují mezi sebou a výsledkem je nový reakční produkt. Takovýmto mechanismem se dají popsat například korozní děje. Schematicky se dá tento děj popsat následujícím způsobem:



Jako následek chemických reakcí je, že postupem času ubývají výchozí látky a jsou nahrazovány reakčními produkty:



Rozsah chemické reakce lze vyjádřit rovnicí:

$$\xi = \frac{n_{zreag \cdot A}}{a} + \frac{n_{zreag \cdot B}}{b} = \frac{n_{vznik}}{z} \quad (21)$$

Tak jak se mění okamžitá koncentrace výchozích látek, mění se i rychlost chemické reakce.

Okamžitou reakční rychlost můžeme vyjádřit vztahem:

$$J = \frac{d\xi}{dt} \quad (22)$$

Pro jednosložkovou homogenní soustavu je zreagované množství:

$$n_{zreag} = n_{puvod} - n_{souc} \quad (23)$$

Rozsah takovéto chemické reakce je potom:

$$\xi = -\frac{n_A}{a} = \frac{n_Z}{z} \quad (24)$$

a její reakční rychlost:

$$J = \frac{1}{a} \cdot \left(-\frac{dn_A}{dt}\right) = \frac{1}{z} \cdot \left(\frac{dn_Z}{dt}\right) \quad (25)$$

Rychlost ubývání výchozí látky je:

$$v_A = -\frac{dn_A}{dt} \quad (26)$$

Odolnost elektrického zařízení proti teplotnímu namáhání se posuzuje dle nejslabšího článku zařízení. U každého zařízení to může být něco jiného, a například u slídového izolačního systému se považuje za nejslabší složku pojivo, případně syntetická folie či papír.

Základní literatura k problematice teplotního znehodnocování [13], [18].

### 3.3 Korozní znehodnocování

Kolem nás ve vzduchu se nachází mnoho různých pevných i plyných látek, které se podílejí na korozním znehodnocování. Tyto látky se dostávají do ovzduší přirozeným způsobem a exhalacemi při činnosti člověka. Jako dominantní mechanismus pro korozní děje označujeme chemické a fyzikálně chemické působení prostředí na materiál. Tyto děje můžeme popsat pro různé typy materiálů, jako jsou např. kovy, plastické hmoty, textil a spousta jiných látek, které reagují s prostředím. Mezi nejvíce ovlivňované materiály pomocí korozních dějů jsou kovy.

#### 3.3.1 Mechanismus koroze

Pro vysvětlení korozních dějů budeme vycházet ze skutečnosti, že kov se snaží změnit na stabilnější sloučeninu, ve které se vyskytuje v přírodě. Tento děj probíhá samovolně a kov má tendenci se změnit do formy oxidů, hydroxidů nebo solí. Kovy vyskytující se v prostředí více či méně reagují s okolními složkami, přičemž dochází ke slučování nebo výměně elektronů

vyskytujících se v dané reakci. Tato skutečnost nám dovoluje dělit korozní děje podle toho, jestli dojde k reakci přímým spojením dvou atomů, či dochází-li k reakci prostřednictvím iontů reagujících složek korozního děje. Do první skupiny popsané výše zařazujeme typickou chemickou korozi, která zapříčiňuje na povrchu kovu tvorbu tenké povrchové (oxidové) vrstvy. Tento děj je velmi významný, ale ne však rozhodující. Jako zásadnější korozní děje se považují elektrochemické pochody, přičemž zasaženou soustavu si můžeme představit jako galvanické články. Korodující kov a korozní prostředí tvoří elektrodový systém s elektrolytem.

Chemická koroze probíhá v elektricky nevodivém prostředí, které představují nevodivé plyny či kapaliny. Nejběžnějším případem toho typu koroze je oxidace kovů. Oxidace vytváří na povrchu materiálu velmi tenkou vrstvu, a pokud máme prostředí se zvýšenou teplotou nebo zvýšeným tlakem plynu, může dojít k reakci i ve větší hloubce. U chemické koroze dochází k přeskupování elektronů mezi reagujícími složkami a tím je tato koroze typická. Pokud se vytvoří souvislá vrstva na povrchu kovu, tak ta zapříčiní přístup korozních látek ke kovu a chová se jako vrstva s ochranným charakterem. Jestliže se ale vytvoří nesouvislá, porézní nebo odpadávající vrstva, tak tato vrstva kov nechrání.

Když mluvíme o elektrochemické korozi, tak se jedná o korozi, která probíhá ve vodivém prostředí. Jestliže je kov ponořený do roztoku, obsahující ionty tohoto kovu. U povrchových atomů kovu se začnou uvolňovat valenční elektrony. Ionty, které vzniknou tímto způsobem, začnou přecházet do roztoku a naopak ionty z roztoku přecházejí na kov. Dle elektrolytického rozpouštěcího tlaku můžeme určit, jestli se kov nabije na kladnou nebo zápornou hodnotu. Je-li tento tlak větší než osmotický, tak kov bude záporný, pokud tlak je menší než osmotický, tak kov bude kladně nabitý. Zanedbáme-li ostatní faktory, které mají vliv na korozi, můžeme říci, že čím je standardní potenciál kovu zápornější, tím bude pravděpodobnější, že bude napaden elektrochemickou korozi. Aby vůbec mohla vzniknout elektrochemická koroze, musí vzniknout elektrodový potenciál, který vznikne, když je porušena rovnováha na elektrodě zapříčiněná depolarizací.

### **3.3.1.1 Korozní činitelé**

Jestliže korozní činitel souvisí s korodovaným materiálem, tak jej označujeme za korozní činitel vnitřní. Korozní činitele vnější popisujeme tak, že závisejí především na chemickém složení a fyzikálních vlastnostech korozního prostředí.

Mezi hlavní aspekt vnitřních činitelů se uvádí čistota kovu. Odolnost čistého prvku totiž vyplývá z polohy, ve které se nachází v periodické soustavě. Pokud materiál není čistý a obsahuje různé nečistoty, tak to může ovlivnit výrazně rychlost, s kterou materiál koroduje. Nečistoty tvořící s kovem tuhé roztoky jsou méně nebezpečné než je tomu u slitin se vzájemným poměrem složek  $1/8$ ,  $2/8$  až  $n/8$ . U heterogenních slitin může dojít k nerovnoměrnému vylučování příměsí, což může mít za následek urychlený vývoj koroze.

Vlastnosti, na které se v tomto případě dává zřetel, jsou velikosti zrn a poměr vylučovaných fází. Dalším vnitřním činitelem je stav povrchu korodujícího kovu. Jemně opracované povrchy mají obecně lepší korozní odolnost než je tomu u materiálů hrubě opracovaných, které mají větší aktivní plochu a tak jsou ke korozi více náchylné.

Do vnějších činitelů zařazujeme zejména složení prostředí, ve kterém se výrobek nachází, a dále mechanické zatížení, kterému je materiál vystaven. Mezi největší stimulatory koroze v prostředí můžeme řadit síru, chlór, čpavek, dusík a další prvky. Jako další vlastnosti prostředí, které mají vliv na korozi je teplota, vlhkost, pH atp..

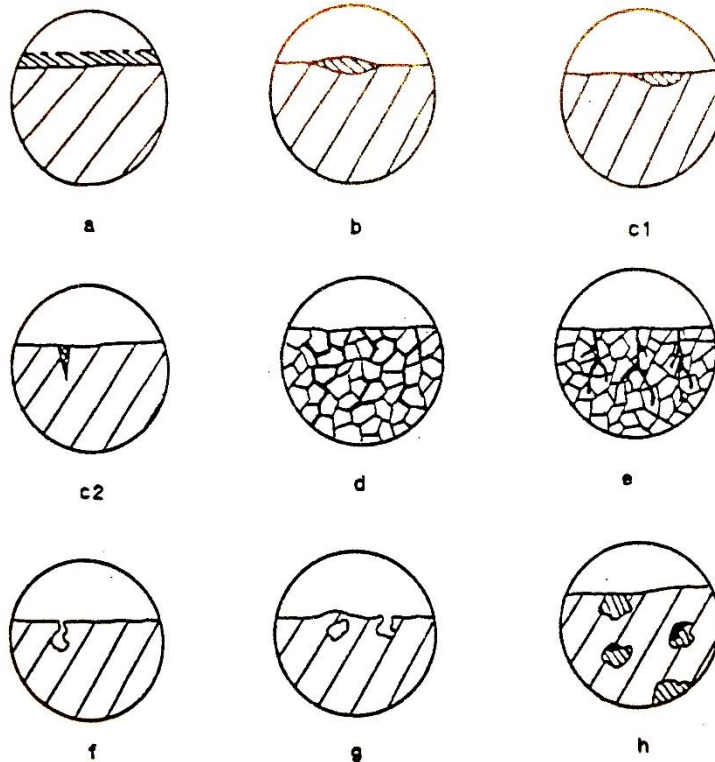
### 3.3.2 Korozní napadení

Na korozní napadení kovu se dá nahlížet ze dvou pohledů. Buď toto napadení můžeme posuzovat podle typu nebo charakteru napadení, kdy je důraz kladen na reakčnost agresivního prostředí.

Z hlediska typu korozního hlediska se určuje několik typů napadení (Obr. 29). Rozhodujícími vlastnostmi pro rozdělení je, jestli je materiál napaden jen na povrchu a nebo jestli koroze napadá i vnitřní strukturu.

Obr. 29: Základní druhy korozního napadení

*a – rovnoměrné; b – skvrnité; c1 – důlkové; c2 – bodové; d – mezikrystalové; e – transkrystalové; f – podpovrchové; g – puchýřkové; h – selektivní [13]*



Rovnoměrná koroze (Obr. 29 a.) vzniká přibližně stejnorodě po celé ploše vystavené koroznímu prostředí. Mechanismus je takový, že nejdříve vznikají projevy na korozních centrech, které jsou určovány korozními podmínkami. U rovnoměrné koroze bývá těchto center velké množství. Toto množství je dáno velkou reaktivitou kovu s daným prostředím. Tímto mechanismem je postupně napaden celý povrch a ze všech ostatních napadení je tento typ nejpriznivější. Existují různé kovy jako například stříbro, měď, ocel a zinek, které jsou často napadeny rovnoměrně a tak se dají použít pro klasifikaci korozní agresivity prostředí.

Nerovnoměrná a skvrnitá koroze (Obr. 29 b.), oproti rovnoměrné korozi, se vyskytuje jen v určitých místech povrchu kovu. Též se nejdříve vyskytuje v korozních centrech, kterých však není tolik jako v předešlém případě. Korozní centra se začnou rozšiřovat do stran a tvoří takzvané skvrny, které se s okolními skvrnami začínají spojovat a vytvářejí napadení rovnoměrné. Vlivem styku korozně odlišných kovů, teplotních rozdílů, koncentračních článků, různého transportu korozního prostředí po povrchu nebo rozdílných vlastností kovu přechází skvrnitá napadení v nerovnoměrné.

Důlkové a bodové koroze (Obr. 29 c.) můžeme nejčastěji pozorovat u pasivovaných kovů. Porušením pasivované části vznikají korozní centra, která nejsou velká, ale korozní napadení může pronikat hluboko do materiálu. Tento proces se nazývá pitting. Tímto způsobem se dá dosáhnout až prokorodování materiálu. Aby mohlo dojít k tomuto mechanismu, musí se na povrchu nacházet strukturální nehomogenita, nečistota nebo lokální porušení pasivované části povrchu. K bodové a důlkové korozi dochází zejména v prostředích obsahujících chlór, brom nebo jód a jejich solí.

Mezikrystalová koroze (Obr. 29 d.) vzniká na rozhraní zrn a tak proniká do značné hloubky materiálu a tím významně zhoršuje mechanické vlastnosti kovu jako je pevnost či houževnatost. V extrémních případech se může stát, že materiál se rozpadne na jednotlivá zrna. Proti tomuto druhu koroze se dá bránit výběrem vhodného složení slitiny.

Transkrystalová koroze (Obr. 29 e.) je typická tím, že probíhá uvnitř samotných zrn. Tím vzniká mnoho trhlinek napříč materiálem, na jehož rozvoji se značně podílí vnitřní pnutí a korozní prostředí. Transkrystalová koroze stejně jako mezikrystalová koroze je nebezpečná tím, že pouhou vizuální kontrolou ji nelze jednoznačně zjistit.

Podpovrchová koroze se vyznačuje tím, že korozní napadení uvnitř materiálu je významnější než je tomu na povrchu. Poruchy mohou vytvářet pod povrchem zkorodované pásma nebo mohou být spojeny s povrchem. Podpovrchové napadení (Obr. 29 f.) se projeví na nejméně chráněném místě a přes povrch vniká do materiálu, kde může tvořit rozsáhlé dutinky. Puchýřkové napadení (Obr. 29 g.), oproti předešlému případu, je charakteristické tím, že se pod povrchem vytvářejí puchýřky, které mohou prokorodovat na povrch a zaplnit se korozním prostředím, a tak posléze může koroze probíhat i na povrchu.

Selektivní koroze (Obr. 29 h.) napadá jen slitiny s dvěma a více fázovými strukturami. Koroze v tomto případě napadá jen jednu fázi, a pokud je tato fáze dominantní, tak se koroze projevuje jako rovnoměrná. Pokud však je napadená fáze méně zastoupená, tak se koroze jeví jako selektivní. U selektivního napadení musí být zajištěno, aby korozní prostředí bylo schopno proniknout úzkými štěrbinami do kovu nebo aby bylo schopno proniknout méně zasaženou složkou.

Extrakční napadení je v mnoha ohledech podobné předešlému případu, rozdíl je v tom, že u ekstrakčního napadení dochází ke korozi pouze jediné chemické složky. Toto napadení se vyskytuje jako rovnoměrně působící nebo také rovnoměrně pronikající do materiálu, popřípadě můžou vznikat důlky. Typickým příkladem ekstrakčního napadení je odzinkování mosazi.

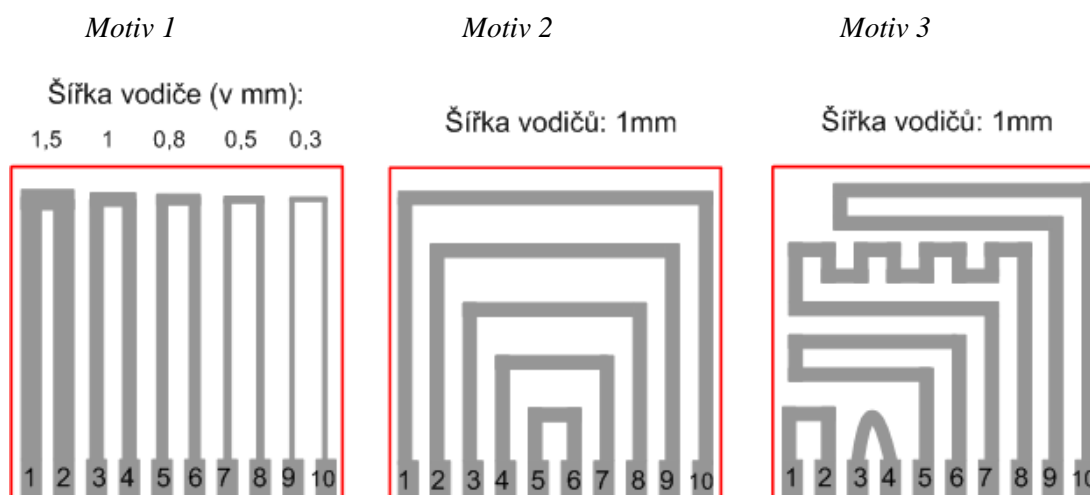
Základní literatura k problematice korozního znehodnocování [13], [14], [17].

## 4 Praktická část

### 4.1 Testovací struktury

Pro testovací materiály jsem využil podložku z korundové keramiky o rozměrech 25 mm x 25 mm. Tento substrát zajišťuje vysokou odolnost, malou tepelnou roztažnost, dobrou přilnavost a rovinný povrch. Na tyto podložky jsem nanесl pomocí ručního sítotisku tři různé motivy (Obr. 30). Touto technikou bylo nanесenou 216 destiček, které byly poskládány do plat o rozměrech 2 x 6 destiček. Pro každé plato platí, že obsahuje vždy 4 destičky od každého motivu. Polovina všech natištěných destiček (108), byla natištěna za pomoci stříbrné pasty CSP-3110D a na druhou polovinu jsem nanесl uhlíkovou pastu s označením CSP-3225. Dále jsem za pomoci šablonové fólie nanесl na polovinu již vyhotovených struktur (jak na polovinu destiček potištěných stříbrnou pastou, tak i uhlíkovou pastou) ochrannou vrstvu, která je tvořena dielektrickou izolační pastou ED8010. Tato vrstva byla nanесena za účelem zjištění, jak se budou chovat nanесené tlustovrstvé vrstvy pod ní. Tím vznikly čtyři rozdílné kombinace natištěných vrstev. Všechny natištěné vzorky jsem rozdělil na třetinu a jednotlivé třetiny jsem posléze umístil do tří různých klimatických podmínek.

Obr. 30: Použité nanесené motivy [5]



Tab. 7: Délky jednotlivých cest [5]

dráha mezi kontakty	délka dráhy (mm)
1-2	41
3-4	41
5-6	41
7-8	41
9-10	41

dráha mezi kontakty	délka dráhy (mm)
1-10	63
2-9	50
3-8	36
4-7	23
5-6	11

dráha mezi kontakty	délka dráhy (mm)
1-2	10
3-4	8,5
5-6	40,5
7-8	61,5
9-10	76,5



Každý jednotlivý motiv má své různé specifikace, které se dají využít pro zjištění změn jak elektrických, tak i z hlediska degradačních pochodů. U motivu jedna se nacházejí stejně dlouhé dráhy, ale s různě širokými cestami. Motiv dva má naopak stejné šířky drah, ale zato má rozdílnou délku natištěných cest. Poslední motiv tři má stejně jako motiv dva stejně široké dráhy, avšak tento motiv se liší tím, že má pro každou cestu různý tvar i délku. Zjišťoval jsem, jestli změny velikostí natištěných drah a jejich různé rozložení, budou mít nějaký zásadní vliv na degradační procesy v různých klimatických komorách, které jsem využil.

## 4.2 Použité tlustovrstvé pasty

Každá tlustovrstvá pasta má rozdílné vlastnosti a je potřeba s ní při tvorbě cest jinak zacházet. Jednotlivé pasty mají své datasheety, kde jsou uvedeny všechny jejich vlastnosti, vytvrzovací teploty nebo jaké síto se má ideálně použít při sítotisku. V následujícím odstavci jsem vybral z dostupných dat několik důležitých parametrů použitých past.

### **Stříbrná pasta CSP-3110D**

- viskozita:  $15 \pm 5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,
- obsah pevných částic:  $75 \pm 2 \text{ wt}\%$ ,
- váha:  $2,6 \pm 0,2 \text{ g/cc}$ ,
- hrubost zrna:  $< 5 \mu\text{m}$ ,
- odpor na čtverec  $\approx 50 \text{ m}\Omega/\square$ ,
- vytvrzování pasty: minimálně při  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 20 minut v troubě,
- doporučené síto: síto s 180 mesh – 400 mesh (platí pro nerez ocel).

### **Uhlíková pasta CSP-3225**

- viskozita:  $20 \pm 5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,
- obsah pevných částic:  $42 \pm 2 \text{ wt}\%$ ,
- odpor na čtverec  $\approx 70 \Omega/\square$ ,
- hrubost zrna:  $< 10 \mu\text{m}$ ,
- vysušování: při  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 2 min – 3 min pomocí IR zářiče,
- vytvrzování: při  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 30 min v troubě,
- doporučené síto: síto s 180 mesh – 250 mesh (platí pro nerez ocel).

### **Dielektrická izolační pasta ED8010**

- vytvrzování: při  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 30 min,
- doporučené síto: 200 mesh,
- doporučený typ síta: polyesterové síto 55 – 77T

### 4.3 Použité klimatické podmínky

Pro moji práci jsem využil laboratoř klimatotechnologie ČVUT. Zde jsem použil tři různé komory, abych vyzkoušel vliv různých prostředí na testovací vzorky. Jako první jsem využil komoru, která mi zajišťuje po celou dobu testování suché teplo o velikosti 100 °C. Jak taková komora vypadá, je znázorněno na Obr. 31.

*Obr. 31: Tepelná komora (sušárna) MEMMERT*



Jako druhé testovací prostředí jsem si vybral komoru, která mi zajišťuje parametry 50 °C a vlhkost vzduchu větší než 95%. Použitá komora je na Obr. 32.

*Obr. 32: Korozní komora LIEBISCH KB 300*



Pro poslední typ zkoušky jsem využil vlastnosti exsikátoru. Tato nádobka dokáže ve svém nitru udržet zvýšenou vlhkost vzduchu, což je pro mé účely potřeba. Jak takový exsikátor vypadá je znázorněno na Obr. 33.

Obr. 33: Exsikátor



#### 4.4 Postup zhotovení tlustovrstvé vrstvy

Pro nanesení příslušných tlustovrstvých past (uhlíkové a stříbrné) jsem v této práci využil síto o parametrech 1400 ok/cm<sup>2</sup>, což odpovídá 70 okům na cm. Použitým materiálem pro vytvoření tohoto síta jsou polymerní vlákna. Pomocí fotocitlivé emulze byly na síto předem připraveny tištěné motivy (Obr. 30). Síto je ukotvené v hliníkovém rámu a vloženo do ručního sítotisku (Obr. 34). V tomto okamžiku již máme vše připravené pro samotný sítotisk a tak můžeme provést první tisk, který slouží jako kontrolní a umožňuje nám případnou korekci přístroje. Samotný sítotisk probíhá tak, že nanese na síto před motiv housenku v dostatečném množství, přibližně o tloušťce 5 mm až 10 mm. Tato nanesená housenka by měla být o něco širší než je samotný motiv, aby nedošlo k tomu, že po vytvoření motivu by na některých místech nebyla dostatečná vrstva pasty. Po tomto kroku přichází na řadu přejetí třerkou po sítu a to jednou až dvakrát, přičemž se nám pasta protlačí skrz síto na podložku. Doporučuje se přejetí třerkou dvakrát, jelikož při prvním přejetí dochází nejdříve k vyplnění ok síta a teprve poté k přenosu na podložku. Nyní máme vytištěný kontrolní pokus a můžeme zhodnotit kvalitu naneseného motivu. Pokud zjistíme, že motiv je jakkoliv neostrý nebo rozteklý či má jinou vadu, musíme upravit zejména vzdálenost síta od podložky pomocí nastavitelných šroubů, které jsou v každém rohu stroje.

*Obr. 34: Ruční sítotisk*



Pokud kontrolní tisk dopadl dobře, položíme na desku připravené vzorky o rozložení 2 x 6 destiček. V této fázi můžeme pohybovat s duralovou deskou tak, abychom správně vystředili substrát pod motiv. K tomuto kroku slouží tři šrouby, pomocí nichž můžeme desku posouvat v ose x a v ose y. Otevřené otvory na duralové desce je nutno zakrýt, aby nedošlo při pohybu těrky k pohnutí destiček. Je tedy potřeba zajistit zafixování destiček pomocí podtlaku. Po zafixování vzorků sklopíme vrchní část stroje a na síto naneseeme pastu. Pomocí táhla, na kterém je umístěna těrka, dvakrát převedeme motiv umístěný v sítu. Po této operaci nadzvedneme vrchní část sítotiskového stroje, očistíme síto a vyndáme vzorky ven a nahradíme je za ještě nenatištěné vzorky. Natištěné vzorky necháme volně ležet několik minut, aby nastal leveling. Tento postup se opakuje pro všechny destičky připravené pro jeden druh pasty. Před dokončením těchto kroků si předejdeme pec na požadovanou teplotu uvedenou výrobcem a hotové vzorky do ní vložíme na nutně dlouhou dobu pro vytvrzení. V meziobdobí, kdy máme desky v peci, důkladně očistíme síto, aby v něm nezbyly kousky předešlé pasty. Po vyčištění síta jsme připraveni celý proces znovu opakovat s další pastou.

Po vytvrzení obou past si vzorky se stříbrnou pastou a uhlíkovou pastou rozdělíme na polovinu. Vytvoříme si šablonu z fólie tak, že otevřené prostory ve fólii překrývají dráhy vytvořené sítotiskem a zbytek fólie zamezuje přístupu pasty na místech s kontaktními ploškami. Naneseeme vyrobenou fólii na vyhotovená pole a stejně jako u sítotisku vytvoříme další vrstvu za pomoci krycí pasty ED8010. Vzorky, na které jsme nanесли tuto pastu, je potřeba znovu vytvrdit v peci po dobu a teplotě udávané výrobcem.

Nyní již máme vytvořené všechny vzorky, a tudíž je rozdělíme na třetiny, tak aby každá třetina obsahovala všechny typy vzorků a provedeme první měření. Rozdělené vzorky posléze uzavřeme do jednotlivých testovacích komor a pokus může započít.

## 4.5 Postup měření odporu tlustovrstvé vrstvy

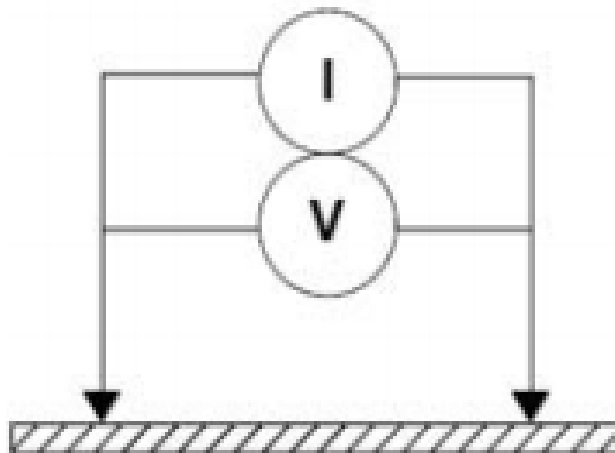
Základním parametrem, který chceme pozorovat při dlouhodobém měření v klimatických komorách, je odpor. Pro určení teoretického odporu je důležité znát pro danou pastu  $\rho$ , nebo-li rezistivitu, délku dráhy  $l$  a odporovou plochu  $A$ . Tato plocha se dá také vyjádřit jako  $d \cdot w$ , kde  $d$  je tloušťka vrstvy a  $w$  je šířka dráhy. Hodnota  $\rho/d$  nám udává velice používanou hodnotu u tlustovrstvých past a to je odpor na čtverec. Tímto způsobem můžeme vzorec pro odpor zapsat takto: [8]

$$R = \frac{l}{w} \cdot R_{\square} \quad (27)$$

Jednotka odporu na čtverec se nejčastěji udává  $\Omega/\square$ , popřípadě jeho násobky či zlomky. V této práci jsem měřil dvě rozdílné pasty, u kterých se liší odpor na čtverec řádově o tři desetinná místa. U stříbrné pasty by měly být dosahovány hodnoty kolem desítek až stovek  $m\Omega/\square$ . Naopak u uhlíkové pasty, která má menší vodivost než stříbrná pasta, by měly být naměřené hodnoty v řádu desítek až stovek  $\Omega/\square$ .

Pro měření vzorky jsem využil dvoubodovou metodu (Obr. 35). Tato metoda může být zatížena chybou přívodních kabelů a tak je potřeba s tímto faktem při naměřených hodnotách uvažovat. Pro body měření odporu jsem vždy využil středy kontaktních plošek pro pozdější reprodukovatelnost měření.

Obr. 35: Dvoubodová metoda měření odporu



Pro měření odporu jsem využil multimetr HP 34401A (Obr. 36), který mi zajišťoval dostatečnou přesnost a reprodukovatelnost měření v průběhu dlouhodobého měření.

Obr. 36: Multimetr HP 34401A



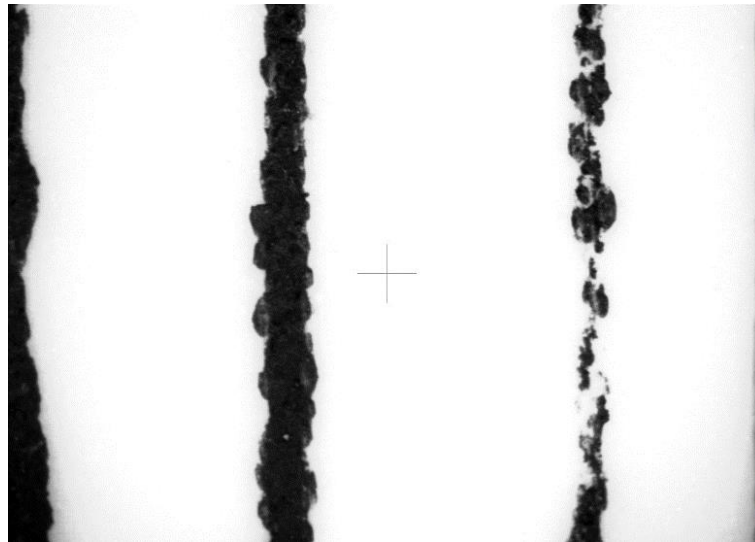
## 4.6 Vyhodnocení měření

Pro vyhodnocení výzkumu jsem využil několik kritérií hodnocení. První z nich je zaměřeno na zjištění kolik zbylo po dlouhodobém namáhání měřitelných vzorků. Druhé kritérium je zaměřeno na vizuální kontrolu a zhodnocení nastalých skutečností. A jako poslední kritérium budou samotné naměřené hodnoty odporů a jejich změna v čase.

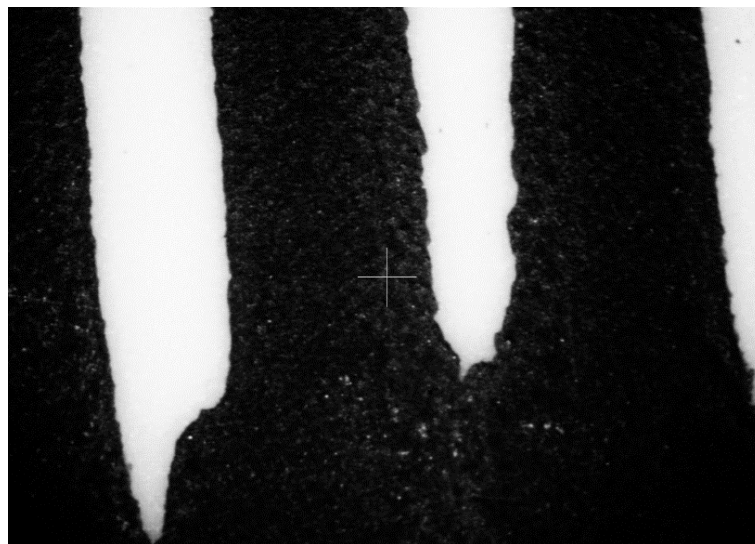
### 4.6.1 Sumarizace natištěných cest

Celkem bylo pomocí sítotisku vytvořeno 1080 vodivých cest, přičemž se při prvním měření zjistilo, že měřitelných cest je 821. Tento pokles hodnot je způsoben nedokonalostí ručního sítotisku, špatně nastavených parametrů a ne vždy úplně do čista vyčištěného síta. Při tisku se stalo, že různé vodivé cesty se slily nebo byly přerušeny a tím se dále nedaly použít pro měření. Různé chyby při tisku jsou vyobrazeny na následujících obrázcích.

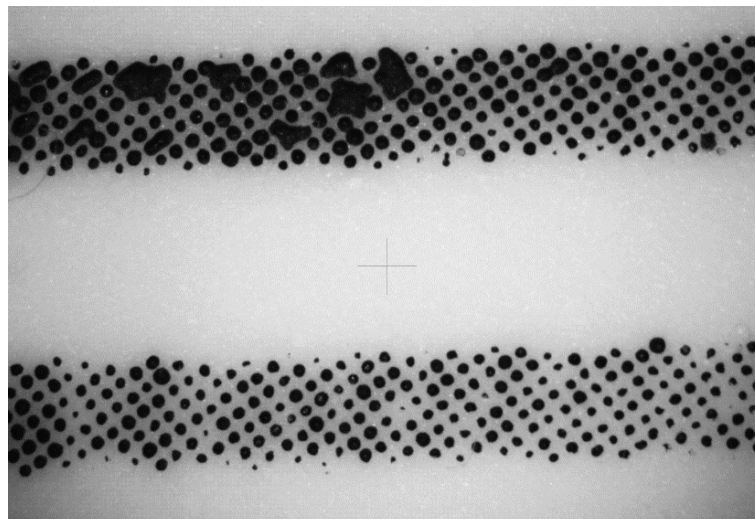
*Obr. 37: Vliv křivé podložky na odtrh*



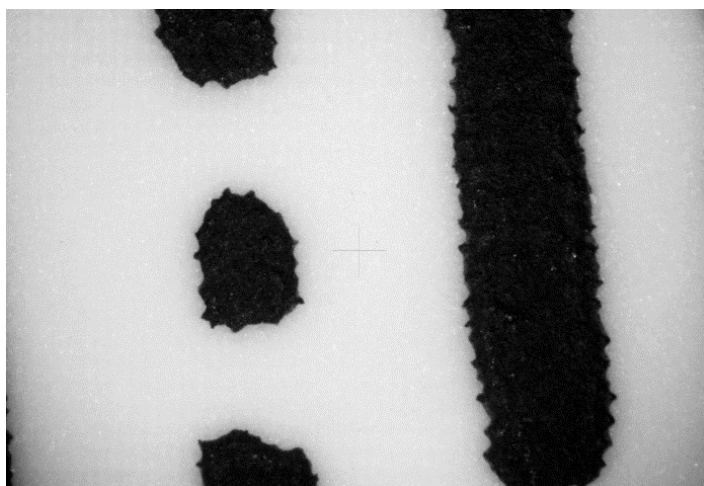
*Obr. 38: Rozlitá pasta – spojení dvou vedlejších čar*



*Obr. 39: Neslitá pasta – vytváření ostrůvků*



Obr. 40: Vliv ucpaní ok



Tyto chyby nebudu započítávat do konečného hodnocení, jelikož nemají nic společného s degračními procesy v klimatických komorách. Výchozí a konečný stav jednotlivých vodivých cest zachycuje Tab. 8.

Tab. 8: Souhrn vytvořených cest

Prostředí	Typ tlustovrstvé vrstvy	Počet aktivních cest při prvním měření	Počet aktivních cest při posledním měření	Procentuální pokles aktivních cest [%]
Teplo	Stříbrná	95	69	27,37
	Stříbrná + ochranná vrstva	54	34	37,64
	Uhlíková	72	72	0
	Uhlíková + ochranná vrstva	71	67	5,63
Vlhko	Stříbrná	44	44	0
	Stříbrná + ochranná vrstva	95	92	3,16
	Uhlíková	66	66	0
	Uhlíková + ochranná vrstva	62	62	0
Teplo + Vlhko	Stříbrná	65	65	0
	Stříbrná + ochranná vrstva	73	46	36,99
	Uhlíková	70	70	0
	Uhlíková + ochranná vrstva	54	27	50

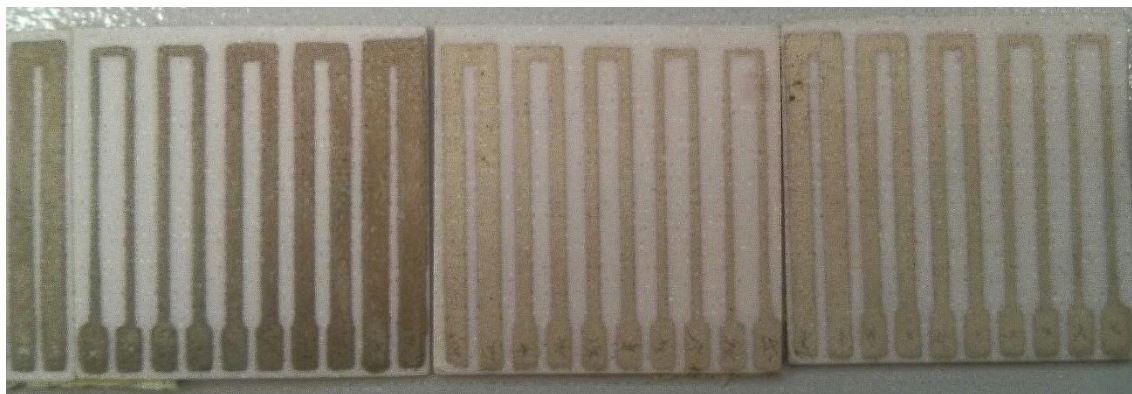


Během znehodnocování, které probíhalo od 25. 6. 2015 až do 13. 4. 2016, se poškodilo 107 drah z původních 821. Způsoby, kterými byly tyto cesty znehodnoceny, se budu zabývat později. Jak je zapsáno ve výše uvedené tabulce, tak u vlhkého prostředí se prakticky žádná vrstva nedostala do stavu, při kterém by již nebyla měřitelná. U teplého prostředí je vidět značný pokles měřitelných cest zejména u stříbrné pasty a to jak s ochrannou vrstvou tak i bez ní. Pro prostředí označené jako teplo + vlhko je největší problém ochranná vrstva a to jak pro stříbrnou tak i uhlíkovou pastu.

## 4.6.2 Vizuální kontrola

Další možnost hodnocení je vizuální změna, která proběhla za dobu testování. To, jak jednotlivá klimatická prostředí působila na natištěné vzorky, zachycuje Obr. 41. Vlevo je vzorek, který byl usazen v komoře při nastavené teplotě 100 °C. U tohoto vzorku došlo k největším povrchovým změnám ze všech tří testovacích prostředí. Lze u něj pozorovat výrazné ztmavnutí stříbrné pasty, které je způsobeno oxidací povrchu. Podobného projevu se dosáhlo u vzorku vpravo, který se nacházel v komoře za podmínek 50 °C a vysoké relativní vlhkosti přesahující 95%. Je zde také vidět ztmavnutí povrchu, ale ne tak výrazné jako tomu bylo v předešlém případě. Nejmenších změn se dosáhlo u prostředního vzorku, který se nacházel v exsikátoru, kde byla zajištěna relativní vlhkost přesahující 95%. Zde se oxidace ani jiné viditelné změny neprojevíly.

*Obr. 41: Vizuální kontrola vzorků stříbrné pasty*



U vzorků, kde byla nanášena čistě uhlíková pasta, po vizuální stránce nenastala žádná změna. Nevznikly zde žádné změny odstínu a ani se nevytvořily žádné oxidové vrstvy. Jinak tomu je však u vrstev, kde se nanášela ochranná vrstva (Obr. 42). Stejně jako tomu bylo u stříbrné pasty, tak i zde pozorujeme největší změnu u vzorku nacházejícího se uprostřed a vystaveného vysokým teplotám. Ochranná vrstva je vystavena dlouhodobě vysokým teplotám, při kterých dochází k vysoušení pasty a vytěkání různých látek z materiálu. Tímto způsobem se dosáhne viditelného zesvětlení vrstvy až skoro zešedivění. Vzorek vpravo, zasažený vlhkým

prostředím, se barevně nijak výrazně nezměnil, ale i na tomto vzorku můžeme pozorovat již nepatrné bublinky vzniklé při absorpci vody, při které tato vrstva začala bobtnat. U vzorku vlevo dochází působením vyšší teploty k vysoušení, což je ale zpomaleno přítomností vysoké vlhkosti, a tak oproti samotné vysoké vlhkosti zde již pozorujeme vizuální změny.

*Obr. 42: Vizuální kontrola vzorků s nanesenou ochrannou vrstvou*



Při nanesení vyššího množství ochranné vrstvy na vzorek způsobovalo, zejména u vzorků nacházejících se v prostředí vlhko + teplo, puchýřkovatění a bobtnání. Vzniklé puchýřky vlivem teploty poté praskaly a narušovaly ochranné vlastnosti této vrstvy. Názorná ukázka prasklého puchýřku a nerovnosti samotné ochranné vrstvy je zachycena na Obr. 43.

*Obr. 43: Prasknutý puchýřek*



U prostředí se suchým teplem a vzorku s vyšší vrstvou ochranné vrstvy docházelo k praskání této vrstvy a dokonce i k jejímu odlupování od korundového substrátu. Vysoká teplota narušuje mechanickou soudržnost a způsobuje pnutí v materiálu. Tím mohou vzniknout jak velké trhliny, které lze jednoduše identifikovat, tak i častěji malé trhlinky nepozorovatelné

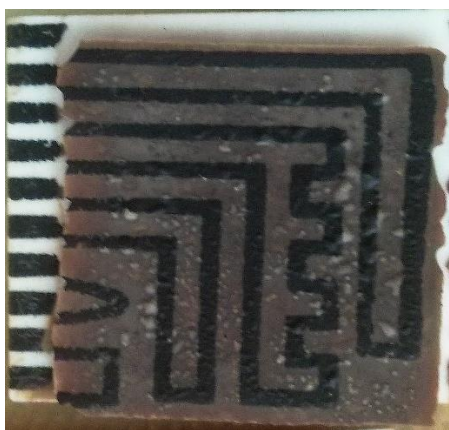
pouhých okem, které však mají také zásadní vliv na vlastnosti materiálu. Příklad takto narušeného vzorku můžeme hledat na Obr. 44.

*Obr. 44: Popraskání ochranné vrstvy*



U některých vzorků testovaných v prostředí vlhko + teplo se stalo, že celá vrstva, krom kontaktních plošek, se od korundové podložky odtrhla. Na Obr. 45 je patrné, že uhlíková pasta, která byla natištěna dříve než ochranná, se spojila s touto vrstvou na velmi pevné bázi. Adheze uhlíkové pasty k podložce byla menší než tomu bylo ke krycí vrstvě, a tak působením vnějších faktorů bylo umožněno odloupení ochranné vrstvy společně s vrstvou, kterou měla chránit.

*Obr. 45: Odloupení vrstvy*



V korozní komoře LIEBISCH KB 300, při testování stříbrné tlustovrstvé vrstvy, se vyskytly na některých vzorcích korozní vrstvičky, které byly nejspíše způsobené tím, že tato komora byla dříve využita i pro hodnocení korozních vlastností za použití sirnatého znečištění. Stříbro a její slitiny výrazně s těmito látkami reagují a tak i zbytkové množství z předešlého pokusu mělo nejspíše vliv na mé vzorky. Nicméně tyto vzniklé málo vodivé sulfidové vrstvičky se dále nerozšiřovaly, a tak nemají výrazný vliv na měřené parametry.

Obr. 46: Korozní znehodnocení

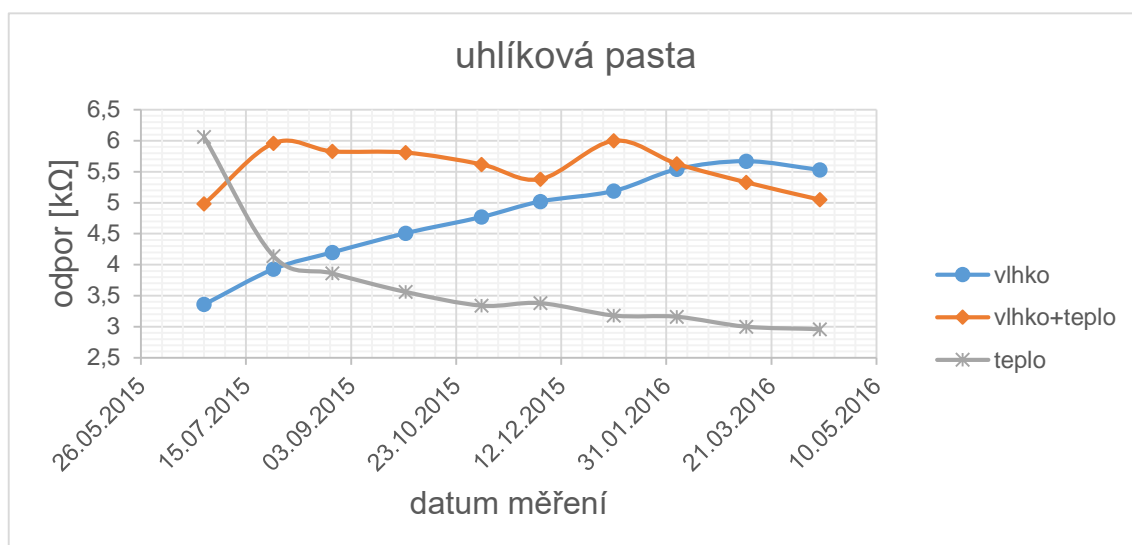


### 4.6.3 Vyhodnocení naměřených odporů

Pro velké množství dat jsou všechny hodnoty zaznamenány v příloze. Z těchto hodnot jsem vždy vybral jeden typický průběh z každého prostředí pro všechny kombinace nanesených vrstev.

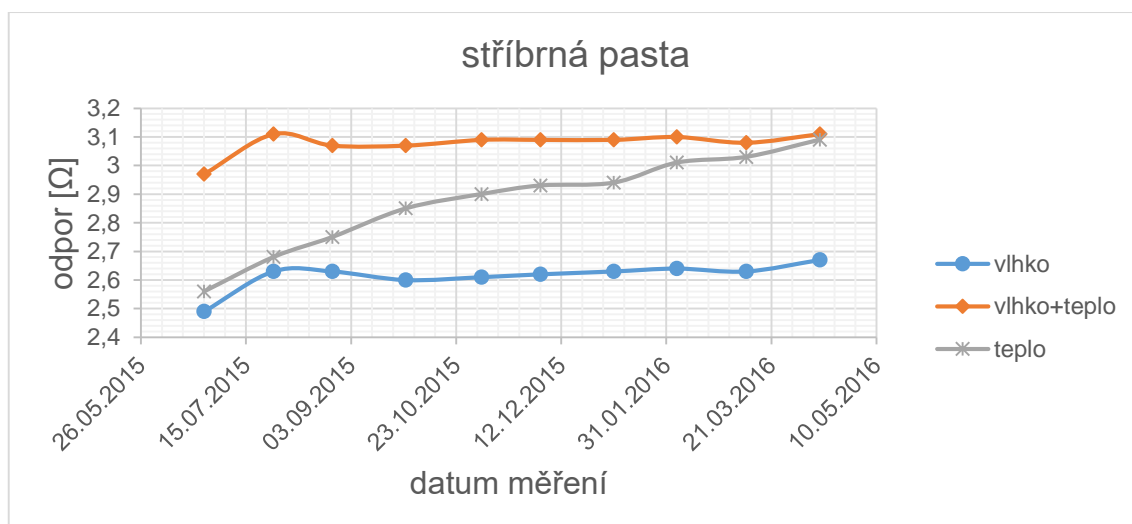
Jako první bych se zaměřil na vliv prostředí u uhlíkové pasty. Tato pasta obsahuje přibližně 42% pevných částic, které tvoří funkční složku. Velikost zrn je zde větší než u stříbrné pasty a to přibližně dvojnásobně. Z Obr. 47: Vliv okolí na uhlíkovou pastu Obr. 47 vidíme, že v prostředí se suchým teplem máme nejdříve vysoký pokles odporu a následně relativně mírný pokles až do konce testování. První pokles může být způsoben odbouráním části organické či modifikující složky a zvýšením procentuálního zastoupení funkční vodivé složky. Následný pozvolný pokles je nejspíše způsoben dalším dotvrzováním vrstvy. V prostředí se zvýšenou relativní vlhkostí nám prakticky po celou dobu testování roste odpor cesty až na poslední měření. To je způsobeno tím, že vlhkost se postupně dostává do struktury materiálu a tím zvyšuje její odpor, jelikož elektrická vodivost vody je mnohem menší než je tomu u uhlíku nebo dokonce u stříbra. Pro poslední vzorek platí, že byl vystaven jak zvýšené vlhkosti, tak i zvýšené teplotě 50 °C. Z toho jak jsem popisoval předešlé děje, vidíme, že tyto dva děje by měly působit proti sobě. V první fázi, stejně jako u vzorku s vlhkostí, pozorujeme nejdříve nárůst odporu a posléze začne převažovat děj, který působí u vzorku se suchým teplem a hodnota odporu začne mírně klesat. Výrazný nárůst u tohoto vzorku nastává na přelomu roku, kdy vzorek byl přes svátky vyndán z testovací komory a byl ponechán působení běžného okolí. Zde se domnívám, že tím jak byl vzorek delší dobu mimo testovací komoru, tak vychladnul a tím se více projevila vlhkost již obsažená v materiálu.

Obr. 47: Vliv okolí na uhlíkovou pastu



Stříbrnou pastou CSP-3110D nanesené vrstvy se chovají výrazně jinak než je tomu u vzorků nanesených uhlíkovou pastou. Největší vliv na tuto pastu pozorujeme především u vzorku vystavenému suchému teplu (Obr. 48). Stříbro nám začalo na povrchu výrazně oxidovat a s tím i ztrácelo na vodivosti. Tento děj probíhal po celou dobu testování a jeho výsledek je vidět na Obr. 41 vlevo. Vzorky vystavené vlhkosti a kombinaci vlhka a tepla nejeví výrazné zhoršení ani zlepšení. Jedinou změnou je prvotní nárůst odporu způsobeno absorpcí okolní vlhkosti. Posléze dochází k ustálení a jen k minoritním změnám.

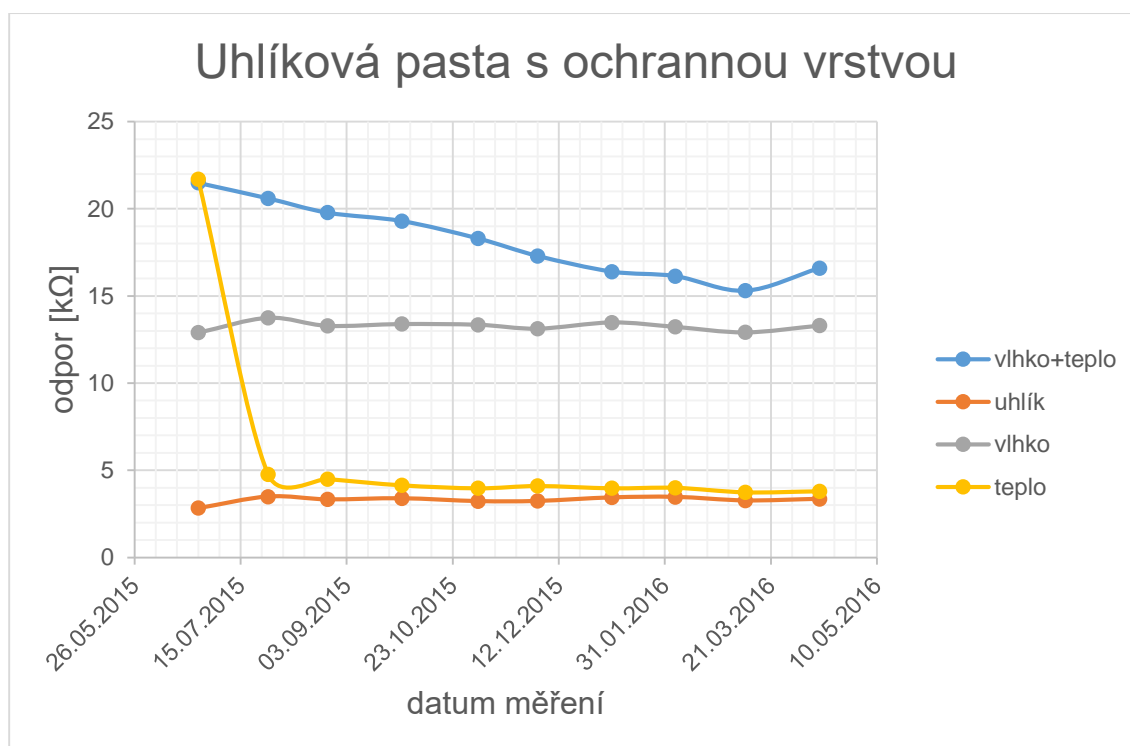
Obr. 48: Vliv okolí na stříbrnou pastu



Samostatná kapitola je vliv ochranné vrstvy na elektrické vlastnosti vrstvy pod ní. Krom jednotlivých typů prostředí jsem na Obr. 49 dal do porovnání i nanesenou uhlíkovou vrstvu bez

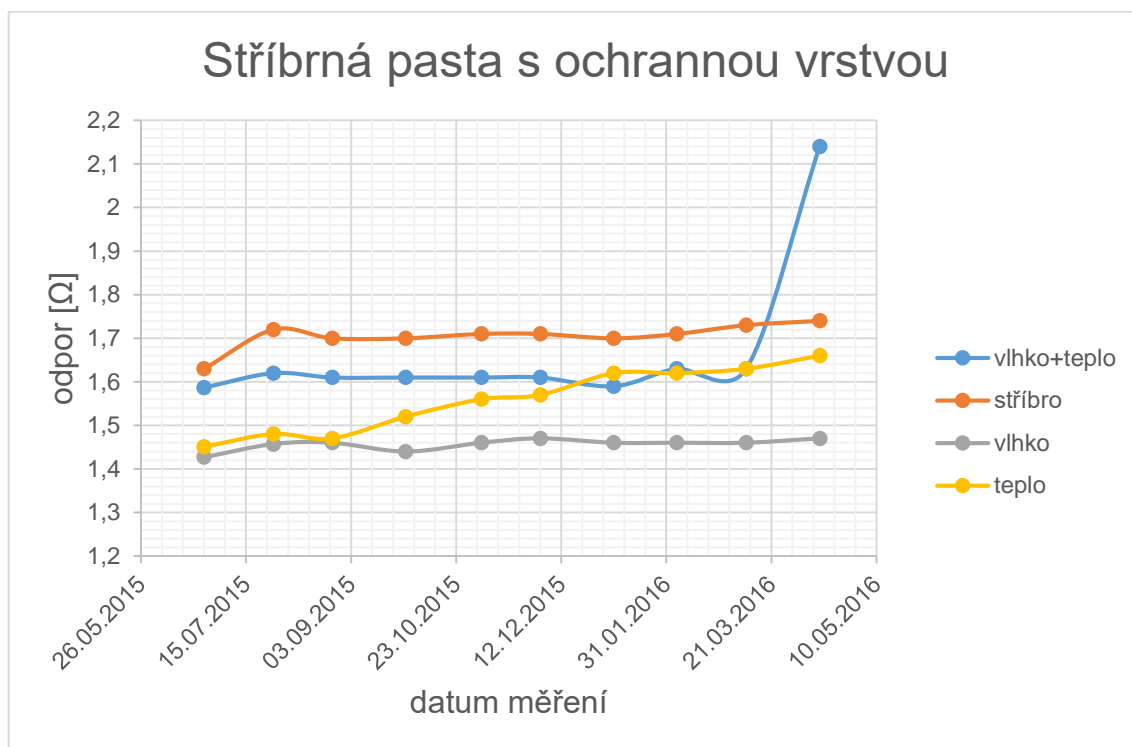
ochranné vrstvy označené oranžovou barvou. Tloušťka právě nanesené ochranné vrstvy zde hraje velkou roli. U prvního měření se dosahovalo hodnot v rozmezí několik k $\Omega$ , a proto lze hodnotit jen změny trendů. Nicméně lze vidět, že tato ochranná vrstva velmi ovlivňuje odpor nanesené vrstvy pod ní. Je to způsobeno nejspíše tím, že mezi těmito vrstvami došlo k chemické reakci a tím k ovlivnění elektrických parametrů. Další parametr, který výrazně ovlivňoval naměřené hodnoty, byla vlhkost. Vlhkost způsobovala bobtnání, praskání a jiné znehodnocující jevy materiálu. Dále docházelo vlivem vlhkosti k propojování okolních cest na destičce a tím k znehodnocení naměřených dat. U samotné vlhkosti pozorujeme konstantní průběh v celém rozsahu naměřených hodnot. Přidáním zvýšené teploty k vlhkosti docházelo k poklesu odporu, ale nedošlo k takovému poklesu, aby se hodnoty přiblížily k hodnotám bez ochranné vrstvy. K tomu došlo jen u vzorků vystavených vysoké teplotě, kde již při druhém měření jsem se dostal na srovnatelné hodnoty se vzorky bez ochranné vrstvy.

Obr. 49: Vliv okolí na uhlíkovou pastu s ochrannou vrstvou



Oproti předešlému případu stříbrná pasta nejspíše nezreagovala s ochrannou vrstvou a tak již od prvního měření byly hodnoty srovnatelné s vrstvami bez ochrany. U stříbrné pasty můžeme relativně říci, že zde ochranná vrstva zapůsobila a splnila svůj účel. U kombinace vlhko + teplo při posledním měření skokově narostla hodnota odporu, což může být způsobeno vznikem malých trhlinek jako je na Obr. 51

Obr. 50: Vliv okolí na stříbrnou pastu s ochrannou vrstvou



Obr. 51: Vzniklé malé trhlinky



## Závěr

Tato diplomová práce vychází z poznatků, které jsem načerpal při bakalářské práci. Bakalářská práce se zaměřovala na vlastnosti tlustovrstvé struktury v závislosti na tvaru. Nyní jsem na tuto práci navázal a zjišťoval navíc vliv okolního prostředí. Z naměřených hodnot jsem usoudil, že vliv okolního prostředí nemá zásadní vliv na naměřené hodnoty pro různé délky, šířky nebo zakřivení. Proto jsem největší pozornost věnoval vlivům okolního prostředí na vzorky dlouhodobě umístěné v klimatických komorách.

Jako testovací materiál jsem si vybral stříbrnou a uhlíkovou pastu, kterou jsem pomocí ručního sítotisku nanесl na korundovou podložku. Ruční sítotisk není ideální variantou pro dokonalé nanесení vrstev, a tak ihned po natištění byly zjištěny velké nedostatky u některých vzorků. Tyto vzorky nebylo možno měřit a proto jsem je dále neuvažoval pro hodnocení degračních jevů. Dále mě zajímalo, jaký vliv bude mít krycí vrstva nanесená na část vzorků. Po zhotovení testovacích vzorků byly vzorky rozděleny na třetiny a vloženy do klimatických komor. První komora nám zajišťovala suchý horký vzduch, druhá vysokou relativní vlhkost při pokojové teplotě a třetí kombinovala tyto parametry.

U komory se suchým horkým vzduchem bylo zjištěno, že na stříbrnou pastu tento děj působí tak, že vytváří na povrchu oxidovou vrstvičku a pozvolna zvyšuje hodnotu odporu. Na uhlíkovou pastu měl tento děj vliv opačný, jelikož uhlíková vrstva se po celou dobu neustále dotvrzovala a tak se její odpor zmenšoval. Při testování vrstev s ochrannou vrstvou jsem upozoroval, že když vrstva kryla stříbro, tak plnila svůj účel. U uhlíkové pasty to bylo podobné, jen s tou změnou, že tento děj nastal až po prvním měsíci působení prostředí. U některých vzorků nastalo přesušení krycí vrstvy a vlivem pnutí v této vrstvě došlo k jejímu popraskání.

V druhé komoře docházelo vlivem zvýšené teploty a vysoké relativní vlhkosti k jiným dějům. U uhlíkové vrstvy nastal nejdříve nárůst odporu způsobený nejspíše absorpcí vlhkosti a posléze k pozvolnému poklesu danému vyšší teplotou. U stříbrné pasty také můžeme pozorovat v první fázi nejdříve nárůst odporu, ale poté relativní ustálení na konstantní hodnotě. U stříbrné pasty s krycí vrstvou nevidíme výraznější odchylku od normálně naměřených hodnot a tak se dá říci, že zde své úkoly plní. Jinak tomu je však u uhlíkové pasty, kde krycí vrstva, která ji měla chránit, s ní zreagovala a zvýšila výrazně odpor jednotlivých cest. Na tuto skutečnost může mít i vliv, že tato vrstva dokázala velmi dobře absorbovat okolní vlhko a tím propojit okolní cesty. Vlhkost měla další vliv na ochrannou vrstvu takový, že vrstva bobtnala, vytvářela puchýřky a se spojením s vyšší teplotou poté praskala.

U poslední komory (exsikátoru) bylo zaměřeno hledisko na vysokou relativní vlhkost a její vliv na vzorky. Na uhlíkovou vrstvu tento stav působil tak, že odpor po celou dobu testování takřka lineárně rostl. Zde se projevuje výrazně nižší vodivost vody než je tomu u uhlíkové



pasty. U stříbrné pasty tento děj není tak znatelný. Lze jej pozorovat zejména v první fázi, ale poté již dále odpor neroste a spíše osciluje kolem konstantní hodnoty. U uhlíku s krycí vrstvou také pozorujeme výrazné zvýšení odporu oproti tomu, když vrstva tuto ochrannou vrstvu nemá. Mimo to se však zdá, že vysoká relativní vlhkost další negativní vliv na odpor nemá. I zde, u ochranných vrstev s vyšší nanesenou tloušťkou, pozorujeme bobtnání, ne však praskání. U stříbrné pasty tento negativní děj nenastává a tak se odpor nijak výrazně nemění.

Celkově jde tedy říci, že krycí vrstva spíše negativně ovlivňuje odpor u uhlíkových cest a u stříbrných relativně plní svoji ochrannou funkci. Pokud je v prostředí zvýšená vlhkost, tak se projevuje negativní vliv propojování cest, který není přípustný u jakéhokoliv zapojení. Přes snahu nanést stejně velkou tloušťku krycí vrstvy se tak nestalo. Tím pádem bylo zajímavé pozorovat, jak se tyto vrstvy budou chovat v jednotlivých prostředích. Pokud byla nanesena tenká vrstva, tak se různé negativní děje tolik neprojevovaly. Naopak s rostoucí tloušťkou se častěji stávalo, že vrstva neodolala prostředí a před ukončením měření byla znehodnocena natolik, že nebylo nadále možno na ní měřit.

V této práci jsem si znovu vyzkoušel práci s ručním sítotiskem a poté získal nové zkušenosti s prací s klimatickými komorami. Zjistil jsem, jak jednotlivé klimatické jevy působí na různé druhy tlustovrstvých past a rozšířil si znalosti v degradačních procesech.

Pokud by byl uskutečněný podobný výzkum, tak by bylo vhodné se zaměřit například na vliv různě tlustých ochranných vrstev a také vyzkoušet další krycí pasty. Bylo by též určitě zajímavé prozkoumat jednotlivé reakce mezi vrstvami a následný vliv na jednotlivé elektrické nebo mechanické vlastnosti.

# Seznam symbolů

A, a	materiálová konstanta [-] počet čtverců rozměrová hodnota [m]
A <sub>0</sub>	světlost [%]
B, b	materiálová konstanta [-] rozměrová hodnota [m]
C	materiálová konstanta [-]
C <sub>0</sub>	vrstvová (měrná) kapacita [pF·cm <sup>2</sup> ]
d	tloušťka materiálu, průměr [m]
E <sub>p</sub>	elektrická pevnost [kV·mm <sup>-1</sup> ]
f	absolutní vlhkost vzduchu [kg·m <sup>-3</sup> ]
G	elektrická vodivost [S]
I	elektrický proud [A]
i	entalpie vzduchu [kJ·kg <sup>-1</sup> ]
J	rychlost chemické reakce [mol·s <sup>-1</sup> ]
l	vzdálenost, délka [m]
M <sub>p</sub>	hmotnost vodní páry [kg]
M <sub>vz</sub>	hmotnost suchého vzduchu [kg]
n	koncentrace hustota tkaniny
p, p <sub>p</sub> , p <sub>vz</sub> , p <sub>0</sub>	tlak plynu, vodní páry, vzduchu, nasyceného stavu [Pa]
R	odpor [Ω]
R	molární plynová konstanta [8,314 J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
R <sub>m</sub>	mechanická pevnost [MPa]
R <sub>p</sub> , R <sub>vz</sub>	molární plynová konstanta vodní páry, vzduchu [J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
R <sub>v</sub> , R <sub>□</sub>	vrstvový odpor, též odpor na čtverec [Ω/□]
R <sub>0</sub>	počáteční odpor [Ω]
ΔR	rozdíl odporů [Ω]
r	poloměr [m]
S	plocha [m <sup>2</sup> ]
S <sub>C</sub>	plocha kondenzátoru [m <sup>2</sup> ]
T	termodynamická teplota [K]
t	tloušťka [m]
t <sub>d</sub>	tloušťka dielektrika [m]

$t_r$	teplota rosného bodu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\Delta t$	změna teploty [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$U$	elektrické napětí [V]
$V$	objem [ $\text{m}^3$ ]
$v$	rychlost ubývání výchozí látky
$w$	rozměrová hodnota [m]
$x$	vodní obsah [ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]
$Z, z$	materiálové konstanty [-]
$\alpha$	součinitel teplotní roztažnosti [ $1\cdot\text{K}^{-1}$ ]
$\varepsilon_d$	permitivita dielektrika [ $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
$\varepsilon_r$	relativní permitivita
$\theta$	úhel smáčení [ $^{\circ}$ ]
$\lambda$	měrná tepelná vodivost [ $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
$\xi$	rozsah chemické reakce
$\rho$	měrný elektrický odpor (rezistivita) [ $\Omega\cdot\text{m}$ ]
$\sigma$	povrchové napětí [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
$\phi$	relativní vlhkost [%]

# Seznam použité literatury

- [1] SZENDIUCH, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*, Brno: VITIUM, 2006. 396 s. ISBN 80-214-3292-6
- [2] SZENDIUCH, I. *Tlusté vrstvy* [online]. 2008 [cit. 2016-1-9]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a\\_tluste\\_vrstvy.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a_tluste_vrstvy.pdf)
- [3] MACH, P., SKOČIL, V., URBÁNEK, J. *Montáž v elektronice*, Praha: ČVUT, 2001. 440 s. ISBN 80-01-02392-3
- [4] SZENDIUCH, I. *Vrstvové technologie* [online]. 2007 [cit. 2016-1-9]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/vrstvove-technologie/>
- [5] PELIKÁNOVÁ, I. *Tlusté vrstvy* [online]. 2011 [cit. 2016-1-9]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/tlustvrstvy.pdf>
- [6] ONDRÁČEK, M. *Vliv viskozity tlustovrstvé pasty před tiskem na formování vrstev*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Klíma. [cit. 2016-1-9]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12456/BP%20xondra28.pdf?sequence=1>
- [7] ŠAVEL, J. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. Praha: BEN, 2007. 320 s. ISBN 978-80-7300-190-2
- [8] GUPTA, Tapan. *Handbook of thick- and thin-film hybrid microelectronics*. Hoboken: Wiley-Interscience, c2003. ISBN 0-471-27229-9.
- [9] EICHLER, P. *Vlastnosti tlustovrstvé struktury v závislosti na tvaru*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2014. 57 s. Bakalářská práce.
- [10] *Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích* [online]. 2008 [cit. 2016-3-15]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36505.pdf>.
- [11] Ištváněk, J. *Dispenzní tisk tlustovrstvých past*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 88 s. Diplomová práce. [cit. 2016-2-13] Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=16345](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16345)
- [12] ČEJKA, M. *Experimentální zjišťování vlastností integrovaných tlustých vrstev*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 51 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc. [cit. 2016-2-13] Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=57426](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=57426)
- [13] Kudláček I. *České vysoké učení technické v Praze. Elektrotechnická fakulta. Degradací procesy 1. Vyd. 1. ed. Praha: České vysoké učení technické; 1994.*
- [14] SCHWEITZER, Philip A. *Atmospheric degradation and corrosion control*. New York: Dekker, 1999. Corrosion technology. ISBN 0-8247-7709-3.

- [15] Rychtera M., Bartáková B. *Tropikalizace elektrických zařízení*. Praha SNTL 1960.
- [16] Ponec V. a kol. *Adsorbce na tuhých látkách*. Praha SNTL 1968
- [17] Akimov G. V. *Teorie a zkušební metody koroze kovů*. Praha SNTL 1953.
- [18] PETR, J. *Struktura a vlastnosti materiálů II: Izolanty*. 2. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1989.
- [19] *Mollierův i – x diagram*. Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Mollier%C5%AFv\\_diagram#/media/File:Feuchte\\_Luft\\_h-x-Dia.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mollier%C5%AFv_diagram#/media/File:Feuchte_Luft_h-x-Dia.jpg)
- [20] ČSN 03 8900 část 2-1 Klasifikace podmínek vnějšího prostředí
- [21] ČSN IEC 721-3-0 až 7 Klasifikace podmínek prostředí a jejich stupňů přísnosti