

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

---

**Katedra elektrotechnologie**

**Vrstvové technologie v elektrotechnice**

**The Layers Technologies in Electronics**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

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

Autor práce: Jiří Vobr

---

**Praha 2019**

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vobr** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **465827**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Vrstvové technologie v elektronice**

Název bakalářské práce anglicky:

**The Layers Technologies in Electronics**

Pokyny pro vypracování:

1. Popište vlastnosti a strukturu tenkých a tlustých vrstev.
2. Uveďte technologie pro vytváření tenkých a tlustých vrstev. Podrobněji popište vybrané tlustovrstvé technologie.
3. Připravte sady vzorků tlustovrstvých struktur z polymerních sítotiskových past vytvrzovaných při různých podmínkách.
4. Změřte parametry vzorků a vyhodnoťte je zvláště s přihlédnutím k podmínkám vytvrzování.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Mach, P., Skočil, V., Urbánek, J.: Montáž v elektronice, ČVUT Praha 2001
- [2] Gupta, T.: Handbook of thick- and thin-film hybrid microelectronics. New Jersey, 2003
- [3] Haicl, M.: Vlastnosti polymerních tlustovrstvých odporů, bakalářská práce, FEL ČVUT Praha 2014

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.02.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2021**

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce. Dále prohlašuji, že jsem uvedl veškeré použité zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 28. 4. 2019

.....

Jiří Vobr

# Poděkování

Rád bych poděkoval paní Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za její pomoc při prvních měřeních, její trpělivost a její dobré rady, jež mi měření velmi usnadnily a urychlily.

V Praze dne 28. 4. 2019

.....

Jiří Vobr

# Anotace

Cílem této bakalářské práce je seznámení čtenáře s technologiemi tlustých a tenkých vrstev a jejich vlastnostmi. V teoretické části jsou vysvětleny definice tlusté a tenké vrstvy, dále jsou zde uvedeny materiály na jejich výrobu a s nimi spojené i jednotlivé základní technologie, postupy pro jejich realizaci a srovnání vlastností a struktur tlustých a tenkých vrstev. Praktická část je zaměřena na vytvoření několika sad vzorků za použití různých druhů past, měření elektrických vlastností (elektrického odporu) vzorků, zkoumání jejich rozměrů, povrchu a nedokonalostí povrchu, a nakonec detailní měření reliéfu vrstev a jejich průměrné tloušťky. Vyhodnocení zmíněných měření a zkoumání je vynesení závislosti elektrického odporu na teplotních podmínkách při vytvrzování u jednotlivých vzorků, okomentování jednotlivých vad a různých rozměrů způsobených špatnou tvorbou vzorků nebo rozdílným stářím past a okomentování rozdílů, co se reliéfu a průměrné tloušťky týče v závislosti na stáří a druhu pasty.

## Klíčová slova

vrstevové technologie, tenké vrstvy, tlusté vrstvy, sítotisk, tlustovrstvé pasty, writing, jetting, napařování, naprašování

# Annotation

A goal of the bachelor thesis is to introduce the reader with thick and thin film technologies and their characteristics. Theoretical part of this thesis is focused on definition of thick and thin film, materials which are used for their production, technics and procedures for their production and comparison of the properties and structure of thick and thin layers. Practical part of this thesis is focused on creating several sets of samples using several different types of thick film paste (ink), measuring electrical properties (electrical resistance) of samples, measuring size, surface and his defects and as last a detailed measurement of the relief of the layers and their average thickness. The evaluation of these measurements is: Show the dependence of the electrical resistance on the curing temperature conditions of the individual patterns, describe individual defects and different sizes of layers caused by wrong sample formation or different age of thick film paste (ink) and describe the differences in relief and average thickness of samples depending on the age and type of thick film paste (ink).

## Key words

the layer technology, thin film, thick film, screen printing, thick film paste (ink), writing, jetting, evaporation, sputtering

## Obsah

Úvod.....	7
1. Tlusté vrstvy .....	8
1.1. Pasty pro výrobu tlustých vrstev .....	8
1.2. Depozice past .....	9
1.2.1. Sítotisk.....	9
1.2.1.1. Síta.....	10
1.2.1.2. Zařízení pro realizaci sítotisku .....	11
1.2.2. Šablonový tisk .....	12
1.2.3. Disperze.....	13
1.2.4. Writing.....	13
1.2.5. Jetting .....	13
1.3. Výpal (sintrace) a vytvrzování tlustých vrstev .....	14
2. Tenké vrstvy .....	15
2.1. Metody depozice tenkých vrstev .....	15
2.1.1. Chemické metody depozice vrstev CVD.....	15
2.1.2. Fyzikální metody depozice vrstev PVD .....	16
2.1.2.1. Napařování .....	16
2.1.2.2. Naprašování.....	17
3. Vlastnosti a struktura tenkých a tlustých vrstev .....	18
4. Praktická část.....	21
4.1. Tvorba vzorků .....	21
4.2. Použité pasty.....	22
4.3. Použité vzory .....	22
4.4. Vytvořené vzorky .....	23
4.5. Měření .....	23
4.5.1. Elektrický odpor .....	24
4.5.2. Měření pod mikroskopem.....	37
4.5.3. Měření tloušťky vrstev .....	43
5. Závěr.....	46
Seznam obrázků .....	47
Seznam použitých zdrojů .....	49
Přílohy .....	50

## Úvod

V dnešní době člověk jen těžko najde místo, kde by se nesetkal s nějakým kusem elektroniky. A jak plyne čas, elektroniky je v našich životech čím dál více a jsou na ni kladeny stále větší nároky, co se výkonosti týče. Jenomže místa na ni je málo, a tak je třeba ji neustále zmenšovat. Na výrobu stále menších a menších zařízení již není možno aplikovat technologie a postupy, jako u těch starších. Proto se dnes již na výrobu takovýchto zařízení hojně využívají technologie tlustých a tenkých vrstev. S jejich rozvojem v dnešní době není problém dosáhnout dobré spolehlivosti a zmenšení velikosti, při stále nízkých nákladech na výrobu.

V této práci se v teoretické části zabývám oběma zmíněnými technologiemi. Popisuji jejich vlastnosti, struktury a technologie výroby. Technologii tlustých vrstev rozebírám trochu podrobněji, neboť hlavně na ni je zaměřená moje praktická část. V té jsem měl za úkol prozkoumat vytvořené vzorky tlustých vrstev na keramických podložkách z korundu za použití různých materiálů a také podmínek při jejich tvorbě. Na tvorbu vzorků byly použity čtyři pasty. První sada se skládala z relativně nových past (doba výroby) a to pasty uhlíkové a stříbrné. Druhá pak obsahovala dvě pasty ze stejných materiálů jako sada první, ovšem obě již byly staršího data výroby.

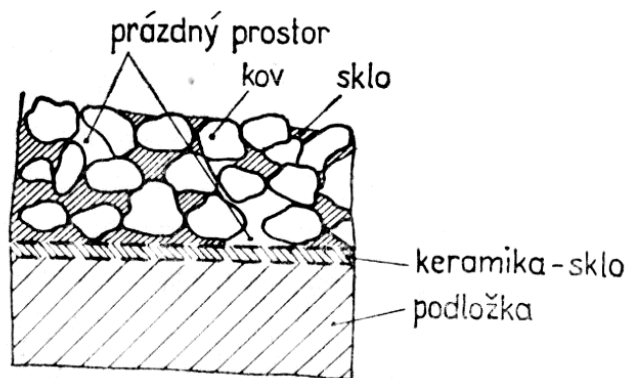
Každá pasta měla stanovenou teplotu a dobu vytvrzení v peci tak, aby vlastnosti vytvořených vzorků odpovídaly hodnotám uváděným výrobcem. S použitím každé pasty jsem vytvořil 4 sady vzorků a každou z nich jsem vytvrzoval při různých teplotách a dobách. Následně jsem u všech vzorků změřil jejich elektrický odpor. Z naměřených hodnot jsem dále vynesl grafy znázorňující závislost elektrického odporu vzorků na podmínkách vytvrzení.

Vzhledem k rozdílnému stáří uhlíkových a stříbrných past jsem se rozhodl také zkoumat, jak se budou vzorky z těchto past od sebe vizuálně lišit. Proto jsem vytvořené vzorky proměřil pod mikroskopem a jejich profil a povrch naskenoval a vyhodnotil pomocí přístroje založeného na hrotové metodě. Závěrem jsem se ještě zabýval vadami, které mohou nastat při tvorbě vrstev na síťotisku.

# 1. Tlusté vrstvy

Tlustovrstvé technologie se v elektrotechnice používají nejčastěji pro realizaci vodivých, odporových a dielektrických vrstev. Nanášejí se aditivními metodami ve formě pasty složené z funkčních materiálů (elektrické vlastnosti past se mohou lišit v závislosti na použití výsledné vrstvy) na keramické podložky. Jejich typickým znakem je amorfní struktura, jenž je vytvořena nevakuovými depozičními metodami. Jednou z nejčastějších metod je sítotisk. Po nanesení vrstvy je třeba ji vypálit/vytvrdit při teplotách pohybujících se kolem 850 °C. Vypálené/vytvrzené vrstvy dosahují tloušťky v rozmezí od 5,08 μm do 50,8 μm. To je přibližně o 2 řády větší tloušťka, než mají tenké vrstvy. [3]

Nejčastějším využitím tlustovrstvých technologií vedle realizace výkonových a mikrovlnných obvodů jsou také nekonvenční aplikace. To jsou obvody, v nichž je děj (signál) šířen jinou než elektrickou cestou. Mezi takovéto aplikace patří například oblasti optických displejů, solárních článků, topných elementů, antén pro čipové karty, vysokonapěťových izolací a pojistek a vysokoteplotních supravodičů. [1]



Obr. 1: Ukázka struktury tlusté vodivé vrstvy se skelnou vazbou po výpalu/vytvrzení [2]

## 1.1. Pasty pro výrobu tlustých vrstev

Materiály pro výrobu tlustých vrstev najdeme ve formě past, v angličtině také „ink“ což v překladu znamená inkoust či tuš, jež jsou složeny z heterogenních složek. Tyto složky se liší svými chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Pasty se vyznačují tixotropními vlastnostmi – jejich viskozita je závislá na mechanickém tlaku.

Výroba past spočívá ve smíchání a rozetření práškových materiálů s pojivem, jenž dodá pastě potřebnou viskozitu. Částice práškového materiálu by měly dosahovat rozměrů o průměrech menších než 5 μm, s co možná nejdefinovanějším tvarem. Tím jsou zaručeny dobré tiskové vlastnosti (bezproblémový průchod oky síta) a homogenita pasty při jejím nanášení a následném vypalování/vytvrzování.

Tyto pasty se skládají ze 3 složek:

- **Funkční složka** – tato složka určuje hlavně vlastnosti (charakter) a použití pasty.
  - Pro vodivé pasty jsou použity drahé kovy.
  - Pro izolační pasty se používá dielektrických materiálů a skleněných frit.
  - U odporových past závisí na použitém odporovém systému, jehož základ mohou tvořit směsi drahých kovů nebo oxidy.
- **Pojivová složka** – vytvoření vazby mezi funkční složkou a substrátem
  - Nízkotavná skla měknoucí při teplotách od cca 600 °C nebo přidané kovy, které vytváří oxidové vazby na substrát.



- Při výpalu/vytvrzování nesmí docházet k roztavení, ale pouze měknutí – to totiž zajistí vytvoření nosné matrice pro funkční složku.
- **Tavivová složka** – pro zajištění potřebné viskozity (dobrých tiskových vlastností)
  - použití organických materiálů (např. terpineol)
  - Při tepelné úpravě vrstvy se pak tyto látky odpaří a na výslednou funkci nemají vliv. [1] [5]

S pastami souvisí vědní obor z oblasti mechaniky spojitého prostředí nazývaný se **reologie** (z řeckého slova „rhein“ - téct), jenž zkoumá tok a plynutí látek. Přesněji řečeno je to věda, která zkoumá a modeluje časově závislé tokové a deformační vlastnosti v různých materiálech. Mezi zkoumané materiály se řadí různé kapalné látky a také látky na pomezí pevné a kapalné látky, kam spadají právě pasty na výrobu tlustých vrstev. Důležitým pojmem v reologii je tzv. Debořino číslo.

$$D = \frac{t_{rel}}{t_{obs}} \quad (1)$$

$t_{rel}$  - relaxační doba daného materiálu charakterizující rychlost molekulárního přeskupení (krátká pro tekutou vodu a velice dlouhá pro tvrdý kámen)

$t_{obs}$  – doba pozorování

Čím menší je Debořino číslo tím tekutější se daný materiál jeví. (To vše však hlavně záleží na době pozorování, neboť při velmi dlouhé době pozorování se mohou jako tekuté jevit i velmi tvrdé materiály). [5]

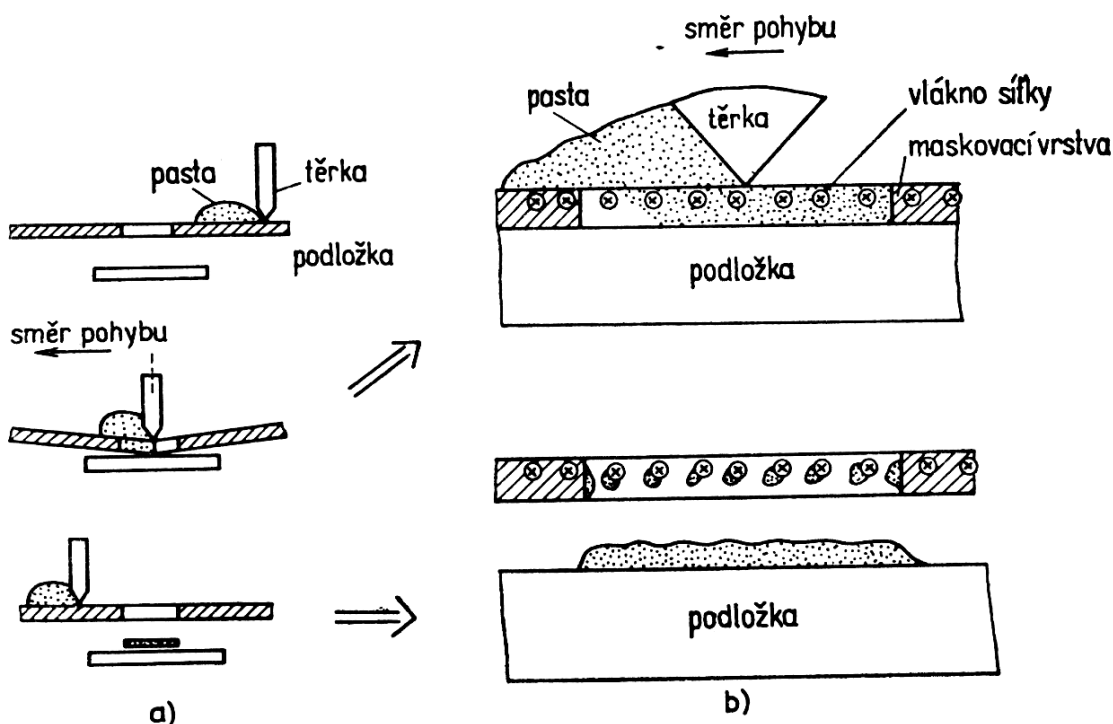
## 1.2. Depozice past

Existuje mnoho způsobů, jakými lze dnes nanášet pasty na podložky. Jejich počet se odpočátku tlustovrstvých technologií značně rozrostl za účelem zvýšení přesnosti a jednoduchosti procesu nanášení a také snížení finančních nákladů. My si zde představíme hlavně ty nejpoužívanější z nich.

První se nabízí jeden z nejstarších, ale stále velmi široce používaných způsobů a tím je sítotisk. Pro svou jednoduchost a nízkou cenovou náročnost se hodí pro velkou část aplikací. Další hojně využívanou metodou je šablonový tisk, který je odvozen od sítotisku. Roli síta zde přebírá šablona vytvořená na fóliích z nejrůznějších materiálů. Tato metoda je výhodná zejména kvůli snadnější obměně motivů ve fólii a jednodušší manipulaci. Mezi další způsoby nanášení vrstev patří například disperze, z níž vychází writing (psaní) nebo jetting (tryskání). Tyto způsoby jsou již cenově náročnější a používají se při speciálních výrobních procesech. [1] [5]

### 1.2.1. Sítotisk

Princip této metody nanášení spočívá v protlačení pasty skrze volné otvory obrazce, jenž je vytvořen na sítotiskové šabloně. Ta je umístěna nad podložkou ve vzdálenosti v rozmezí desetin milimetru. K protlačení pasty skrze síto se užívá těrky. Ta před sebou tlačí pastu nanášenou na šablonu, vlivem tlaku přitiskne šablonu k podložce a protlačí pastu skrze oka síta. Šablona, jenž je napnutá v rámu se poté, co je těrka odsunuta za pomoci pružných sil, odlepí od podložky, na které zůstane nanášen obrazec z pasty.

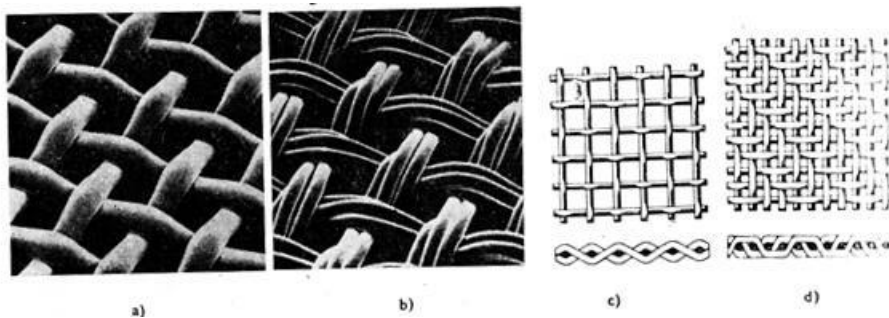


Obr. 2: Princip sítotisku a) jednotlivé fáze tisku, b) detail přenosu pasty [2]

### 1.2.1.1. Síta

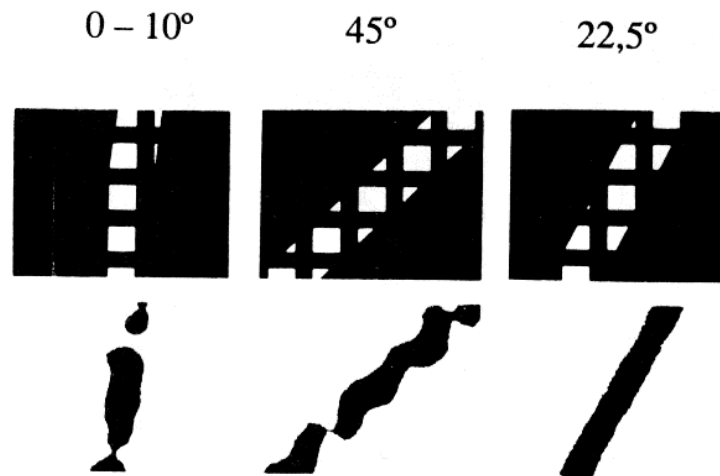
Sítové šablony se skládají z rámu, jenž je tvořen z hliníku nebo z oceli, jenž dodávají rámu potřebnou pevnost a stálost jeho tvaru. Do něj je poté napnutá síťka, tvořená vlákny z nerezové oceli nebo polyesteru. Materiál vláken na vytvoření šablony je vybrán na základě požadavků na přesnost a rozměry nanášeného motivu a také druhu používaných past. Velikost ok síťoviny je srovnatelná s tloušťkou drátů a musí být přibližně 2,5krát větší vůči částicím použitým v pastě, aby byl průchod pasty skrze síťku hladký. Další důležitou podmínkou správného nanášení pasty na podložku je stálá pružnost sítky. Proto musí být rámy vyrobeny z pevného materiálu, jenž vydrží tah napnuté sítky. Ta je do rámu umístěna například na speciálních vypínacích stolech pomocí definované síly ručně nebo strojně. [1] [6]

Tkaniny z ocelových vláken jsou velmi dobře stabilní, co se rozměrů a odolnosti proti otěrům týče, jejich pružnost je však téměř nulová. Šablony, vyrobené z těchto vláken, tak musí být velmi přesně nastaveny nad podložkou, aby bylo dosaženo správného přitlaku těrky a přesného nanášení obrazců na podložku. Při nesprávném nastavení šablony může dojít k poškození těrky nebo šablony samé. Tkaniny z polyesterových vláken dosahují oproti ocelovým velmi dobré pružnosti a po jejich protažení se tak snadno navrátí do původní polohy. [1] [6]



Obr. 3: Různé struktury síťovin z polyesteru – a), b) a z oceli – c), d) [2]

Přesnost při tisknutí zadaného motivu závisí hlavně na velikosti ok síta, úhlu směru vláken síťky a tištěného motivu (ideální úhel bývá uváděn 22,5°), rozměrech dráhy těrky, správném napnutí síťky do rámu a zachování její pružnosti (může být narušena příliš velkým tlakem těrky) a vzdálenosti síta od povrchu podložky. [1]



Obr. 4: Vliv úhlu natočení na síta a obrazce [2]

### 1.2.1.2. Zařízení pro realizaci sítotisku

Základní části zařízení tvoří šablona, těrka s pohyblivým mechanismem a potiskovací stroj s držákem na podložky s regulátorem jejich polohy vůči šabloně ve všech třech osách. Takováto zařízení můžeme rozdělit na ruční, poloautomatická a automatická.

Na ručním zařízení pro sítotisk člověk sám nanese pastu a následně pohybuje těrkou a roztírá pastu vynaložením vlastní síly. Konstrukce tohoto zařízení se skládá z místa na uložení podložek, které nám umožní nastavit jejich polohu vůči pevně uloženému sítu a zaručí pevné uchycení těchto podložek pomocí zarážek a také vytvořením podtlaku a přísátím podložek pomocí externího sacího zařízení. Další část tvoří systém posuvu těrky upevněný na tyčích nebo ližinách a držák pro posuv pomocí ruky. Je jasné, že tato ruční zařízení nikdy nedosáhnou vysoké přesnosti a možnosti použití pro velkou sériovou výrobu zejména kvůli lidské chybě. Využívají se tak hlavně pro výrobu vzorků při různých laboratorních měřeních.

Poloautomatické a automatické systémy jsou znatelně komplexnější. Od toho se odvíjí jejich zvýšená pořizovací a provozní cena, neboť musí dle požadavků obsluhy zajišťovat nastavení podložek a pohybu, přítlaku a rychlosti těrky. Tyto systémy tak dosahují oproti těm ručním velmi vysoké přesnosti, kvality a jednotnosti výsledných vytvářených motivů. [1]



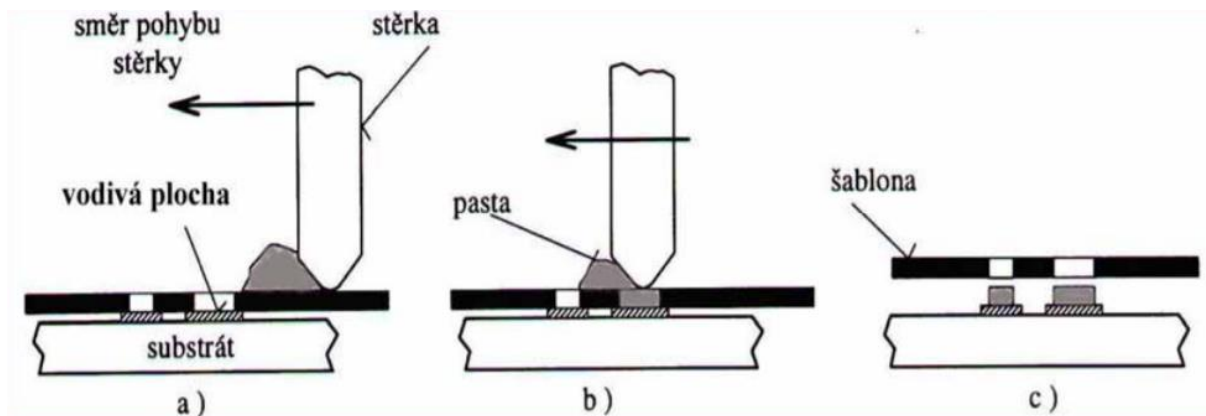
Obr. 5: Ukázka ručního zařízení pro sítotisk [7]

### 1.2.2. Šablonový tisk

Princip šablonového tisku je téměř shodný se sítotiskem. Místo šablony je zde však použita fólie s otvory požadovaného vzoru. Výsledná nanesená vrstva má však trochu jiné vlastnosti než vrstva nanesená pomocí sítotisku. Výsledný motiv je totiž o poznání přesnější, souvislejší a jeho tloušťka je přímo určena tloušťkou použité fólie. Tato metoda se tak hodí pro tisk menších motivů, jenž by kvůli tloušťce vláken byly nerealizovatelné.

Materiál pro výrobu fólií tvoří například plastové materiály anebo různé druhy kovů (ocel, měď...). Plastové materiály pro výrobu fólií jsou oproti kovovým materiálům výrazně levnější. Kovové materiály je navíc třeba pečlivě volit. Jejich životnost může být totiž podstatně kratší, používané pasty by s nimi mohly chemicky reagovat a vytváření vzorů do nich může být náročnější.

Existuje několik způsobů vytváření vzorů do fólií. Ty se od sebe liší hlavně možnou velikostí otvorů, dosažitelnou přesností a v neposlední řadě jejich cenou. Prvním z nejpoužívanějších způsobů je leptání. To je cenově velmi výhodné, avšak minimální velikost otvorů je značně omezená šířkou fólie. Tuto metodu tak pro výrobu malých součástek použít nelze. Na to je zde metoda druhá, kdy je pro vytvoření otvorů použito řezání laserem. To oproti leptání dosahuje o poznání větší přesnosti motivu a také, jak již bylo řečeno, umožňuje vytvářet motivy malých rozměrů. Slabinou této metody je však cena, která mnohonásobně převyšuje metodu leptání. [2] [5]



Obr. 6: Princip šablonového tisku [5]

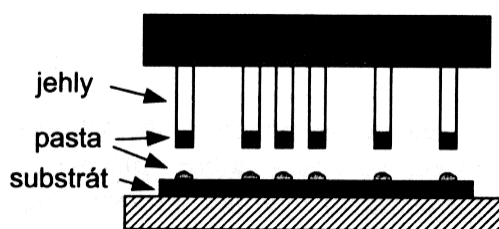
### 1.2.3. Disperze

Jedná se o metodu, kdy je vrstva vytvářena vytlačení pasty ze zásobníku nebo přímým dotykem s podložkou. Výhoda oproti předchozím metodám je možnost vytváření jednotlivých bodů. Z této technologie vychází mnoho dalších metod nanášení. My si zde však uvedeme dvě základní, a těmi jsou writing, v překladu psaní, a jetting, v překladu tryskání.

### 1.2.4. Writing

Tato metoda se dělí na dva hlavní způsoby realizace. Prvním způsobem je nanášení pomocí plné jehly, která může mít různé tvary. Nejprve se jehla namočí do pasty, následně se přesune nad požadované místo na podložce a poté se dotykem pasta přesune na povrch podložky. Rozměry vytvořeného vzorku závisí na viskozitě pasty, množství pasty, která je pomocí jehly nabrána a také na tvaru jehly. Způsob je to sice jednoduchý, ale značně nepřesný.

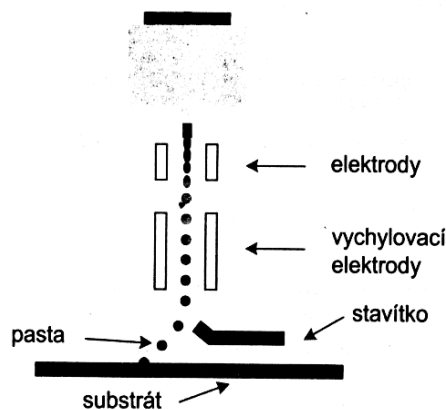
Druhý způsob spočívá v nanášení pasty pomocí duté jehly. Pasta je jehlou vytlačována pomocí mechanických nebo pneumatických systémů. Oproti prvnímu způsobu můžeme mnohem jednodušeji řídit množství nanášené pasty a vzhledem k tomu, že není potřeba jehlu po každé aplikaci přesouvat a opakovaně namáčet do pasty je vytváření vzorů mnohem rychlejší. [1]



Obr. 7: Metoda nanášení pomocí jehly – Writing [1]

### 1.2.5. Jetting

Jedná se o velmi zajímavý způsob nanášení tlustých vrstev. Kapičky pasty jsou vypouštěny na podložku mezi elektrodami, které vytváří elektromagnetické pole. Pomocí tohoto pole lze kapičky vychylovat. Tímto způsobem lze určit jejich dráhu letu a místo, kam mají dopadnout. Tento způsob je při porovnání s writingem o něco rychlejší. S jeho pomocí lze vytvářet vzory velmi malých rozměrů a přesnost při nanášení je také velmi vysoká. [1]

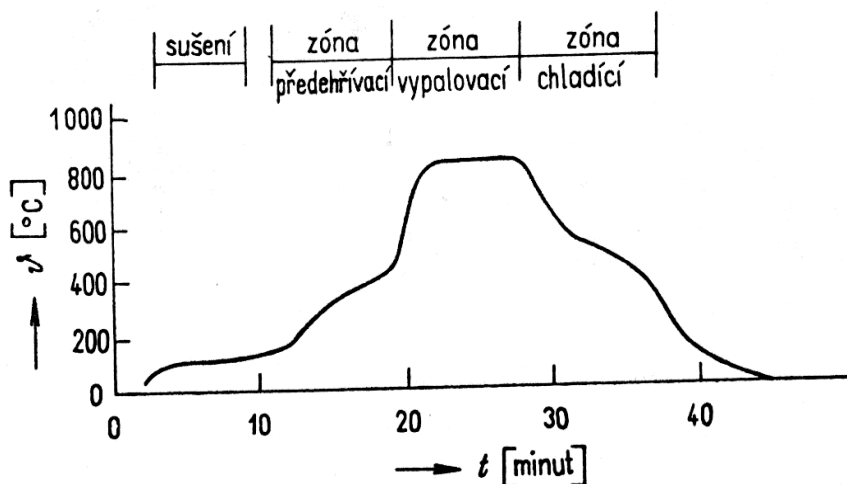


Obr. 8: Princip nanášení pomocí metody jetting [1]

### 1.3. Výpal (sintrace) a vytvrzování tlustých vrstev

Po aplikaci vrstvy na podložku je třeba nanesenou pastu vysušit a následně vypálit/vytvrdit. Vysušením dosáhneme odpaření pojivové složky, která je v pastě obsažena pouze za účelem dosažení požadované viskozity pasty. Ta je potřebná pouze při procesu nanášení vrstvy a na její výslednou funkci nemá žádný vliv. Samotný proces sušení je realizován v závislosti na typu této pojivové složky. Ve většině případů však sušení probíhá při teplotách pohybujících se kolem 100 °C po dobu 10 až 30 minut.

Po vysušení nastává proces vypalování/vytvrzování pasty, který se skládá ze tří na sebe navazujících částí. Nejprve se vrstva předehřívá a tím je postupně dosaženo vypalovací/vytvrzovací teploty. Tento proces je velmi důležitý. Bez něj by totiž kvůli velkému teplotnímu skoku mohlo dojít ke špatnému vypálení/vytvrzení vrstvy a tím i její špatné výsledné funkci. Při části druhé nastává samotné vypalování/vytvrzování pasty, kdy dochází k chemické reakci funkční a pojivové složky. Částice funkční složky se k sobě natěsňují a přesunou se na povrch vrstvy. Pojivová složka po zatuhnutí zajistí jejich pevné spojení s podložkou. Poslední částí je proces chlazení, při němž dochází k postupnému snižování teploty. Bez procesu chlazení by mohlo dojít k poškození vytvořené vrstvy vlivem velkých teplotních rozdílů. Doba a výška teploty při vypalování/vytvrzování závisí na druhu použité pasty. Druh pasty také určuje, zda mluvíme o vypalování nebo vytvrzování. Pro pasty polymerové je tato teplota stanovena zhruba na 170 °C a mluvíme o vytvrzování. Pro pasty anorganické to může být až 800 °C a mluvíme o vypalování. Pro velkou sériovou výrobu je pro vypalování/vytvrzování používáno tunelových pecí, kde vzorky projíždějí na pásu jednotlivými částmi pece, kde dochází k sušení, předehřátí, vypálení/vytvrzení a chlazení. Pro laboratorní účely, kdy je vytvořeno pouze několik vzorků se pak používá pecí muflových. [5] [6]



Obr. 9: Časový průběh teploty při výpalu/vytvrzení vytvořené vrstvy [2]

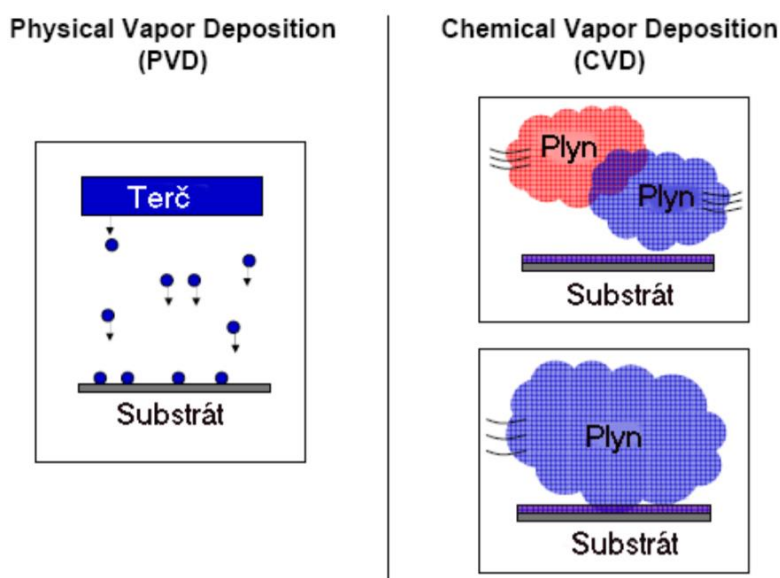


## 2. Tenké vrstvy

Tenké vrstvy jsou amorfni, polykrystalické nebo monokrystalické struktury vytvářené koordinovaným nanášením materiálů na podložky v uzavřeném vakuovém prostoru. Tyto struktury pak dosahují tloušťky v rozmezí od několika desítek nanometrů do jednotek mikrometrů. [8]

### 2.1. Metody depozice tenkých vrstev

Dělí se na dva základní druhy, a těmi jsou chemické metody (CVD – Chemical Vapour Deposition), a fyzikální metody (PVD – Physical Vapour Deposition). Za hlavní charakteristický rozdíl mezi těmito dvěma skupinami metod je brán způsob přípravy vrstvy. [4] [9]



Obr. 10: Způsob přípravy vrstev, z pevného terčiku u PVD metod a z plynu u CVD [9]

#### 2.1.1. Chemické metody depozice vrstev CVD

Chemické metody využívají směsi chemicky reaktivních plynů, jež jsou zahřívány na teploty v rozmezích 950–1050 °C. Materiál na výrobu tenké vrstvy je přiváděn v plynné fázi a jeho usazováním na povrchu substrátu vzniká tenká vrstva v důsledku chemických procesů probíhajících jak v objemu plazmatu, tak na rozhraní mezi povrchem substrátu a plazmatem. CVD metody se realizují ve speciálních aparaturách uzpůsobených pro vysoké pracovní teploty. [3] [4] [9]

Mezi výhody těchto metod patří vysoká čistota, teplotní stabilita a odolnost vrstev proti opotřebení, tvorba vrstev je možná i na těžko dostupných dutinách nebo drážkách a nízké náklady na jejich výrobu (velkovýrobu). [4] [9]

Nevýhodami jsou pak velmi vysoká depoziční teplota a od toho odvozená i vysoká energetická náročnost, dlouhý pracovní cyklus (až 10 hodin), používání ekologicky toxických látek a při depozici dochází k zaoblování hran. [4] [9]

Metoda CVD má řadu různých modifikací. Nejvíce používanou je metoda PEVCD.

## PEVCD – CVD obohacena plazmou

- Ionizace plynu v komoře a vytvoření plazmy zajistí zvýšení energie atmosféry. To umožní snížit teplotu pro vytvoření vrstvy na substrátu. Výsledkem je, že pomocí této metody mohou být tenké vrstvy vytvářeny i na substrátech, které by teploty kolem 1000 °C nevydržely. Oproti klasickému CVD je tato metoda mnohem složitější.
- Nevýhodou je, že tato metoda je jen obtížně použitelná pro nanášení vrstev do dutin a drážek.

Jako další modifikace metody CVD můžeme uvést MWPCVD (CVD v mikrovlnném plazmatu), LPCVD (CVD za nízkého tlaku) nebo LACVD (CVD s pomocí laserového záření). [3] [4] [9]

## 2.1.2. Fyzikální metody depozice vrstev PVD

Fyzikální metody jsou založeny na fyzikálních principech odprašování z terčíků nebo odpařování ve vakuu. Částice materiálu jsou nejprve v pevné fázi (forma destičky, drátku či terčíku) převedeny pomocí odpařování nebo odprašování do plynného skupenství, transportovány ze zdroje k substrátu a následně nanášeny na substrát, kde vytváří tenkou vrstvu. Na rozdíl od metody CVD, se zde neseťkáme s používáním žádných toxicky nebezpečných látek, a proto je metoda PVD považována za ekologicky přijatelnou. Dalším rozdílem je, že při této metodě není potřeba tak vysoké pracovní teploty (od 150 °C do 500 °C) jako u metody CVD. To umožňuje vytvářet tenké vrstvy na substráty vyrobené z látek, jež by pro svou nízkou teplotní odolnost pro metodu CVD použitelné nebyly. Další dobrou vlastností metody PVD je velmi dobré řízení procesu, které zajišťuje vytváření vrstvy o velmi přesných tloušťkách. Obecně vrstvy vytvářené touto metodou vykazují dobré vlastnosti, co se nízkého koeficientu tření a odolnosti proti opotřebení týče. [3] [4] [8] [9]

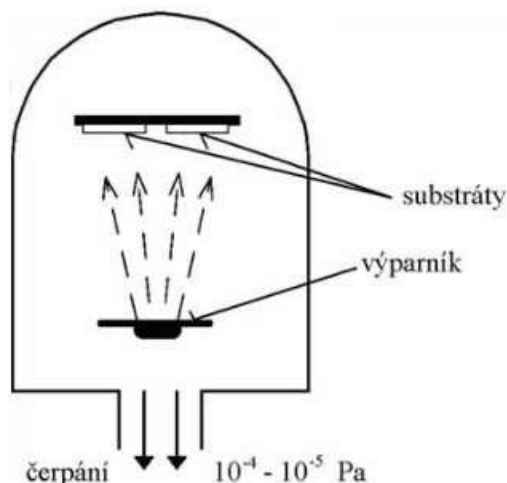
Technologie PVD se dělí zejména podle způsobu převedení materiálu z pevného na plynné skupenství. Nejčastějšími metodami bývá napařování (vysokoteplotní odpaření materiálu odporovým ohřevem) a napařování (bombardování materiálu ionty plynu) [8]

### 2.1.2.1. Napařování

Přesněji se pro tento způsob užívá pojmenování Vakuové napařování. Principem je kondenzace materiálu v plynném skupenství na povrchu substrátu v hermeticky uzavřeném prostoru s vytvořeným vakuem. Ohřevem vloženého materiálu na příslušnou pracovní teplotu dochází ke zvětšení kinetické energie částic materiálu. Z povrchu materiálu se začínou postupně uvolňovat částice (atomů, molekul), které vytváří mrak. Ten má vůči substrátové podložce vyšší teplotu. Mrak při styku s podložkou tak ztrácí nabytou kinetickou energii, na jejím povrchu kondenzuje a vytváří tak tenkou vrstvu. Vakuové prostředí by mělo dosahovat tlaků  $10^{-4}$ - $10^{-6}$  Pa. Vakuum je vytvořeno pro absenci látek obsažených ve vzduchu, které by mohly mít vliv na složení tenké vrstvy a za účelem přímočarého pohybu odpařovaných částic. Ty pak s dostatečnou energií a rychlostí dopadají na substrátovou podložku. Po nanesení částic na podložku však vytvořená vrstva obsahuje velké množství nehomogenit a defektů. Proto se vrstva po nějakou dobu nechává za zvýšené teploty a tím dochází k jejich stabilizaci. [3] [8]



Hlavní část aparatury pro vakuové napařování se skládá z komory, v níž se nachází nástavec na uchycování substrátů a výparník pro vypařování materiálu pro výrobu tenké vrstvy. Výparníky se vyrábí z materiálů schopných vydržet vysoké teploty (wolfram, titan nebo molybden) a rozdělují se na ty s přímým a nepřímým ohřevem. Ty s přímým ohřevem ohřívají materiál pomocí průchodu proudu tímto materiálem. Při nepřímém ohřevu je materiál zahříván dotykem. Materiál pro výrobu tenké vrstvy se vkládá do výparníku v různých formách. Může to být například ve formě tenkého drátku nebo ve formě kuliček. Existují také aparatury, jenž k odpařování materiálu využívají jiné než odporové ohřevy. Odpařování lze dosáhnout např. za pomoci laserů. Výhodou tohoto způsobu je, že tvorba vícesložkové vrstvy může být velmi dobře řízena ve smyslu výběru mezi jednotlivými složkami.



Obr. 11: Zjednodušené schéma komory aparatury pro vakuové napařování [8]

Výhodou vakuového napařování je, že nepotřebujeme žádný pracovní plyn na přenos částic materiálu. Mezi další výhody patří fakt, že samotný proces depozice tenké vrstvy je velmi rychlý a regulací napětí na výparníku můžeme rychlost tohoto procesu řídit.

Zásadní nevýhodou této metody je, že v případech, kdy má být tenká vrstva vytvořena z materiálu ve formě nějaké slitiny se její jednotlivé složky vypařují při různých teplotách a tlacích. Výsledná vytvořená vrstva pak neodpovídá složení materiálu. Další nevýhodou jsou již zmíněné nehomogenity či defekty ve vzniklé vrstvě, proto se musí za zvýšené teploty nechat vrstva ustálit, a to nějakou dobu trvá.

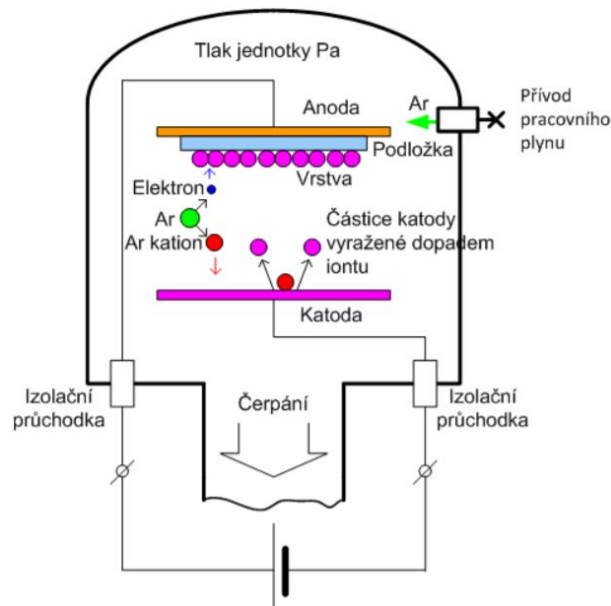
## 2.1.2.2. Napařování

Katodové napařování již v dnešní době předčilo většinu zařízení využívajících technologii napařování tenkých vrstev ve vakuu. Pro realizaci technologického procesu je totiž potřeba z komory odstranit co nejvíce částic zbytkové atmosféry. Nejprve tedy komoru vyčerpáme a vytvoříme co nejnižší tlak a tím odstraníme nežádoucí částice. Poté je tlak ještě snížen, neboť samotný proces nanášení vyžaduje ještě nižšího vakua ( $10^{-1}$  Pa) a nižších teplot. Vytvořené vrstvy také vykazují kvalitnější a více homogenní struktury.

### Princip

V uzavřeném systému je umístěn materiál na výrobu tenké vrstvy ve formě terčíku jako katoda (target). Pod katodou je umístěna anoda, na které jsou položeny substrátové podložky. Mezi anodou a katodou vzniká doutnavý výboj za sníženého tlaku a přítomnosti vháněného inertního plynu (např. argonu). Potenciál mezi elektrodami není rovnoměrný po celé délce, ale je soustředěn blíže ke katodě. Jedná se o takzvaný katodový spád. Tento jev způsobuje, že v místě zvýšeného potenciálu jsou kladné ionty inertního plynu urychlovány. Urychlení způsobí tzv. bombardování katody a

vyrážení částic materiálu. Tyto částice se šíří ve směru anody a vytváří tenkou vrstvu na substrátových podložkách. [4] [8]



Obr. 12: Zjednodušené schéma komory pro technologii katodového naprašování [10]

Mezi výhody této metody můžeme zařadit velmi dobrou homogenitu vytvořených vrstev, vysokou přesnost nanášení na substrát a pro proces není zapotřebí dosažení vysokého vakua.

Jednou z nevýhod je, že proces depozice tenké vrstvy je velmi pomalý. Jako další nevýhody můžeme uvést potřebu pracovního plynu a potřebu chlazení katody (bombardování katody totiž také způsobuje její velké oteplení).

### 3. Vlastnosti a struktura tenkých a tlustých vrstev

#### Mechanické vlastnosti

Jednou z nejdůležitějších vlastností obou vrstev je adheze neboli přilnavost vytvořené vrstvy s podložkou. Při nedostatečné přilnavosti by mohlo dojít k poškození vytvořených vrstev a tím i zhoršení jejich funkčních vlastností. V případě tenkých vrstev se otázka adheze řeší buď ještě před samotným procesem deponace vrstvy úpravou povrchu substrátových podložek nebo vícevrstvou strukturou během procesu nanášení. Povrch substrátových destiček se upravuje buď mechanicky pomocí broušení nebo kartáčování povrchu, anebo chemicky za použití různých kyselin či solí. Tyto úpravy zajišťují odstranění nečistot z povrchu destiček (mastnota, různé oxidy) a také zlepšení drsnosti povrchu. Druhý způsob spočívá v nanesení jedné vrstvy, jež vykazuje lepší přilnavost k povrchu destičky. Na tu se následně nanese vrstva druhá, která dobře přilne k vrstvě první. Těmito způsoby se snažíme zajistit, aby si nanášená vrstva vytvořila s podložkou chemické vazby, které jsou mnohem silnější než vazby fyzikální a zajistí tak dobrou adhezi. V případě vrstev tlustých závisí přilnavost vytvořené vrstvy pouze na pojivové složce tlustovrstvé pasty. Ta se skládá z materiálů na bázi skleněných frit rozemletých na jemný prášek a při procesu vypalování/vytvrzování dochází k roztavení skla a vytvoření fyzických vazeb mezi vrstvou a podložkou. Nebo se může skládat také z kovů, jenž vytvoří s podložkou chemické vazby ve formě oxidů těchto kovů (v tomto případě je však potřeba vyšší teploty při vypalování/vytvrzování vrstvy).

Další důležitou vlastností je tepelná roztažnost materiálů použitých na realizaci vrstvy. Při použití špatných materiálů s velkým rozdílem tepelných roztažností může dojít k poruchám uchycení vrstvy na podložku nebo k jejímu popraskání. To může mít za následek zhoršení funkčních vlastností vrstvy.

Proto je třeba při návrhu tlustých i tenkých vrstev vybírat pro různé aplikace různé kombinace použitých materiálů tak, aby jejich pracovní teploty nevedly k výše uvedeným problémům.

Co se tvrdosti týče, tak té je využíváno zejména v rámci tenkých vrstev. Ty jsou totiž vyráběny metodami, za nichž je vrstva deponována na molekulární či dokonce atomární úrovni. Přidáme-li k tomu fakt, že procesy jsou navíc realizovány ve vakuovém prostředí, kde se mimo výrobního materiálu a inertních plynů nenachází žádné jiné látky, pak můžeme očekávat, že struktura vytvořené vrstvy bude celistvá, bez prasklinek či vzduchových mezer. Tvrdost tenkých vrstev tak dosahuje vysokých kvalit. Proto se tenkovrstvé technologie používají v aplikacích nanášení ošetrných vrstviček na břity a hroty pracovních nástrojů a tím zvyšují jejich životnost a účinnost, nebo jako ochranné vrstvy proti poškrábání na displeje a obrazovky.

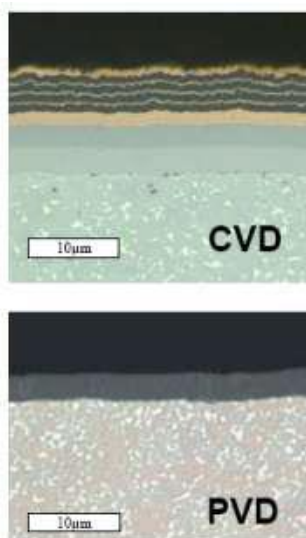
### Elektrické vlastnosti

Do elektrických vlastností bychom zařadili např.: vodivost, relativní permitivitu, dielektrické ztráty, odpor a další. Tyto vlastnosti závisí zejména na materiálu (v případě tlustých vrstev na funkční složce pasty), jenž je použita na výrobu vrstvy s požadavkem na některou z uvedených vlastností a také na technologii přípravy této vrstvy. Některé z elektrických vlastností, konkrétně vodivost, přímo závisí na tloušťce vytvořené vrstvy. V případě tlustých vrstev to není takový problém, neboť pro ně stále platí stejné mechanismy elektrické vodivosti jako pro klasické vodiče, kabely atd. Pro tenké vrstvy s tloušťkou v řádech nanometrů již platí mechanismy naprosto odlišné a je třeba to brát v potaz.

Stejně tak je důležitá stabilita těchto elektrických vlastností, a to v závislosti na teplotě i vlhkosti okolního prostředí (vlhkost, prach). To se dá řešit pomocí nanášení krycích vrstev nebo zapouzdření.

### Struktura

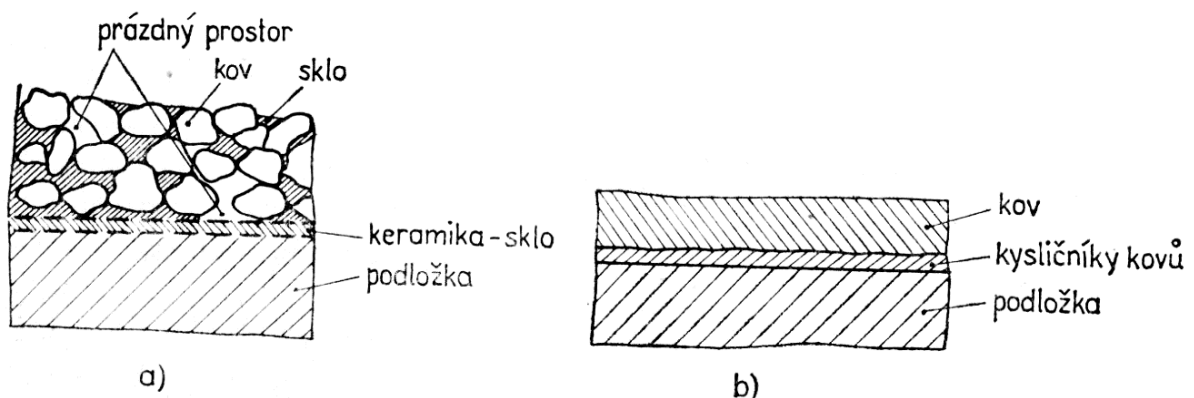
Struktury obou vrstev odvodíme a srovnáme skrze procesy jejich výroby. Výroba tenkých vrstev je založena na principu uvolňování jednotlivých molekul a atomů z povrchu destiček (PVD), nebo vypaření celých drátků či kuliček (CVD) z materiálu pro výrobu výsledné vrstvy. Uvolňování částic je realizováno pomocí proudu zrychlených iontů v inertním plynu nebo doutnavém výboji. Uvolněné molekuly a atomy materiálu poté vytváří na substrátových podložkách výslednou vrstvu. Celý proces výroby se provádí za vyšších teplot a sníženého tlaku. Substrátové destičky jsou navíc čištěny pomocí různých brusných nástrojů a chemikálií. Vytvořená výsledná tenká vrstva tedy v sobě nemá téměř žádné množství nežádoucích prvků, neboť ty jsou odstraněny před procesem výroby pomocí čištění podložek a vakuem během procesu. Dále v ní také nejsou žádné „bublínky“ a prasklinky.



Obr. 13 Řez tenkými vrstvami vytvořenými pomocí CVD a PVD metod [4]

Proces výroby tlustých vrstev spočívá v nanášení speciálních past, skládajících se z různých složek, zajišťujících funkčnost výsledné vrstvy, dobrou viskozitu pasty a pojivové složky, která zajišťuje spojení vrstvy s podložkou. Nanesená vrstva je následně v různě dlouhých časových intervalech postupně předehřívána, vypalována/vytvrzována a chlazená. Kvalita výsledné vrstvy závisí na délce těchto intervalů a na teplotách, za kterých je vrstva vypalována/vytvrzována.

Při vypalování/vytvrzování dochází k odpaření tavivové složky, jež zajišťovala viskozitu, neboť dále již není potřeba. Dále dochází k natavení pojivové složky. Tím je dosaženo vytvoření pevného spojení s podložkou a také to napomáhá shlukování funkčních částic pasty na povrchu vrstvy. Spojení částic funkční složky závisí na teplotě při výpalu/vytvrzování. Při nižších teplotách se částice někdy ani nespojí do nějaké souvislejší vrstvy, ale pouze se shlukují a požadovanou funkci vrstvy zajišťují pouze vzájemným dotykem částic. Při vypalování/vytvrzování při vyšších teplotách se již funkční částice mohou roztavit a vytvořit souvislejší vrstvu než v případě předchozím. Takto vytvořená vrstva však nikdy nebude dosahovat takové homogenity, jaké dosahují tenké vrstvy, protože tvorba vrstvy na atomární úrovni za sníženého tlaku dokáže bezpochyby zaručit mnohem homogennější vrstvu.



Obr. 14 Struktura vodivých vrstev vpalovaných/vytvrzených při a) nižší b) vyšší teplotě a za použití různých tavivových složek [2]

## 4. Praktická část

### 4.1. Tvorba vzorků

Jako praktickou část jsem se rozhodl vytvořit sady vzorků za použití 4 tlustovrstvých past. Pro každou pastu jsem zrealizoval 4 skupiny vzorků, z nichž každá byla vytvrzována při rozdílných teplotách a po rozdílnou dobu (při nižších teplotách je bylo totiž potřeba pro správné vytvrzení nechat delší dobu v peci). Každou skupinu vzorků jsem vytvořil metodou sítotisku. Nejprve jsem očistil keramické destičky, ze spodní strany je slepil k sobě do dvou řad po šesti, abych zamezil nežádoucím pohybům jednotlivých destiček a tím předešel špatnému překryvu se sítím. Dále jsem umístil síto do nástavce, pod něj jsem vložil slepenou skupinu destiček a snažil jsem se pomocí centrovacích šroubů zajistit co nejpřesnější krytí motivů v sítu a keramických podložek. Poté jsem nanesl na síto před motivy vrstvu pasty housenkovitého tvaru. Zapnul jsem vysavač, jenž byl připojen k desce na podložky. Skrze malé otvory nasával vzduch a vytvářel tak podtlak, který přidržel podložky. Poté jsem přiložil těrku na síto a pomocí působení vlastní síly jsem ji přitlačoval k sítu. Pomalu a souvisle jsem ji posouval přes motivy od sebe a následně stejným způsobem zpět k sobě. Dále jsem velmi pomalu odklápěl nástavec se sítím od podložek, aby nedošlo rychlým pohybem k rozmáznutí vytvořených motivů. Po následném vypnutí vysavače jsem vyjmul vzorky, umístil je do horkovzdušné pece a nechal je vytvrdit po definované dobu při nastavené teplotě. Po uplynutí doby jsem vzorky vyjmul a nechal je vychladnout asi 10 minut. Pec jsem mezitím nastavil na další zvolenou teplotu, aby se zahřála a šel jsem vytvářet další vzorky. Takovýto postup jsem opakoval při použití všech čtyř past.



Obr. 15 Použitá horkovzdušná pec

## 4.2. Použité pasty

Pro realizaci vzorků byly vybrány polymerní pasty. Konkrétně to byly 2 pasty, jejichž hlavní (funkční) složku tvoří stříbro (Ag), a 2 pasty s hlavní (funkční) složkou tvořenou z uhlíku (C). Dále je třeba podotknout, že každá z dvojice past měla jiné datum výroby. Dle toho jsem rozlišil pasty na nové (novější) a staré (starší).

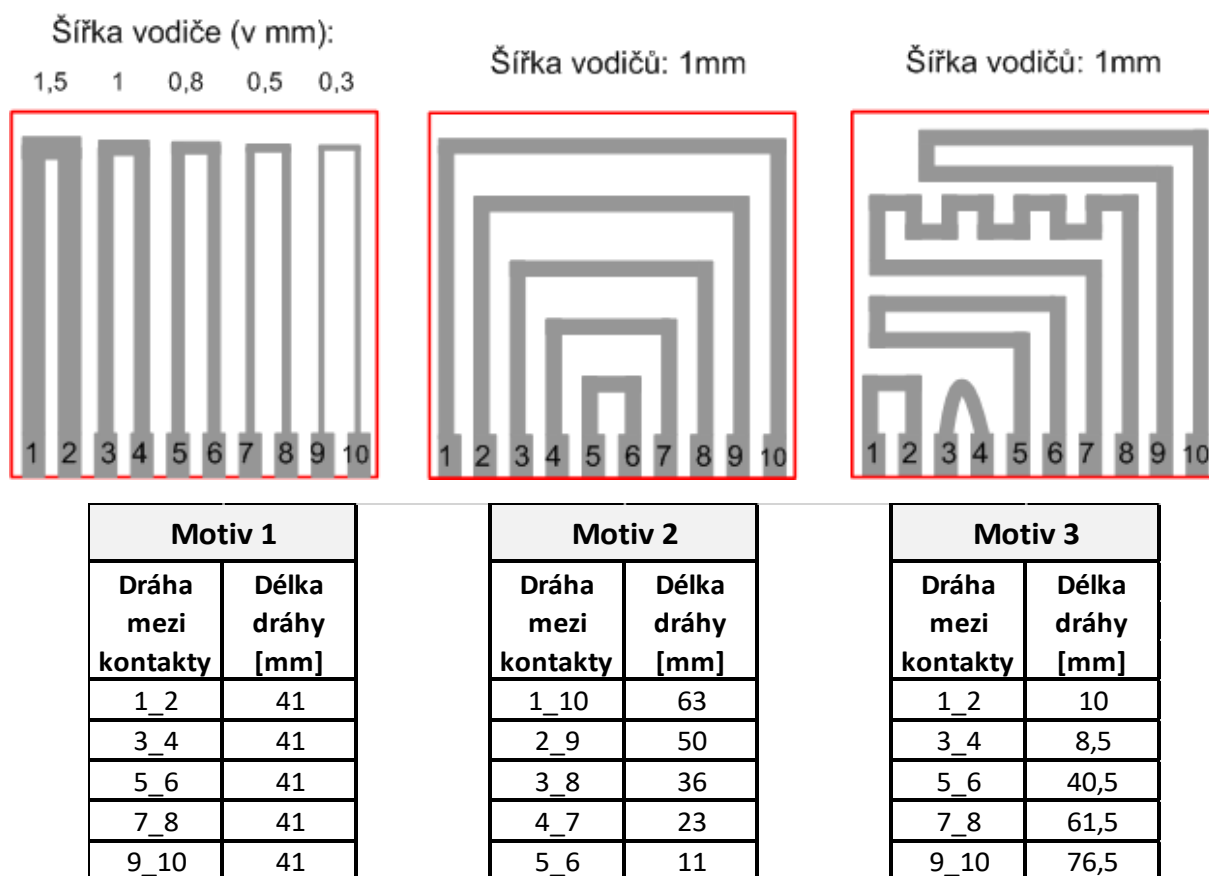
Nové pasty

- Paron-910 Series (Ag) – parametry vytvrzování: 130 °C/30~60 min
- Paron-920 (C) – parametry vytvrzování: 130 °C/30~60 min

Staré pasty - (uvedené časy u obou past jsou definovány jako minimální doba vytvrzování)

- CSP-3225 (C) – parametry vytvrzování: 130 °C/30 min
- CSP-3110D (Ag) – parametry vytvrzování: 130 °C/20 min

## 4.3. Použité vzory



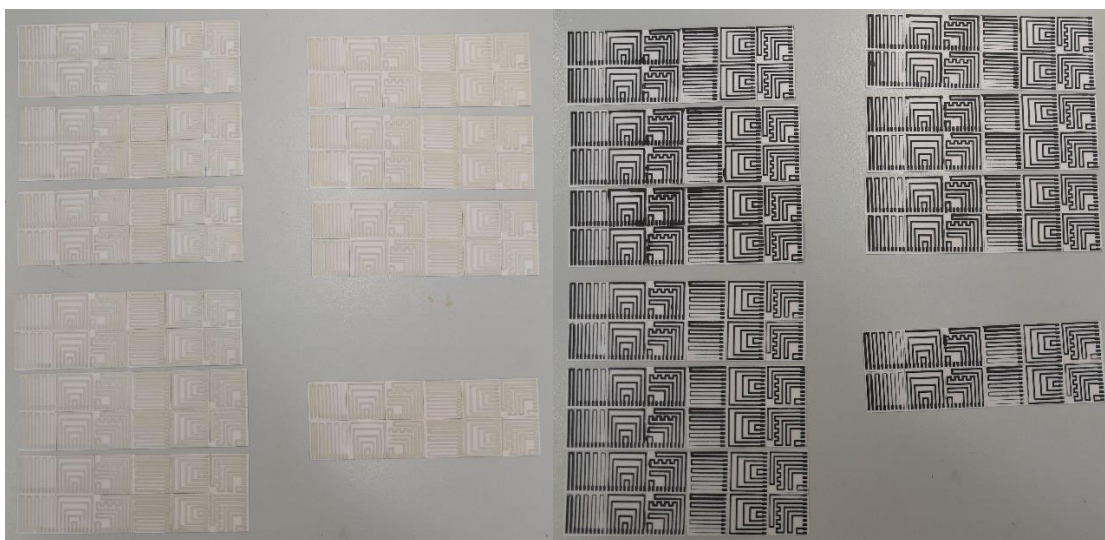
Obr. 16 Vzory v použitém sítu

Ne všechny uvedené vodiče mohly být změřeny. Z motivu 1 kvůli stáří síta (některá oka byla zanesená) a velmi malým rozměrům nebylo možné kvalitně natisknout vodič 9\_10 a z motivu 3 nebyl na sítu vůbec vytvořen kontakt 3\_4.

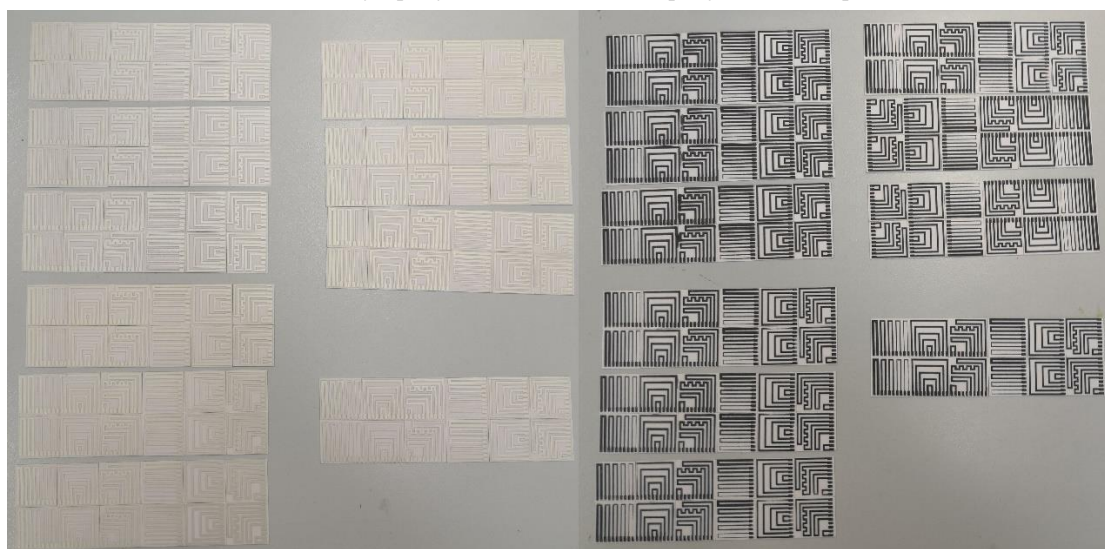


## 4.4. Vytvořené vzorky

Zde jsou uvedeny fotografie vytvořených vzorků.



Obr. 17 Vzorky z pasty CSP-3110D vlevo a z pasty CSP-3225 vpravo



Obr. 18 Vzorky z pasty Paron-910 Series vlevo a z pasty Paron-920 vpravo

## 4.5. Měření

S každou sadou vzorků jsem poté provedl 3 série měření. Při první jsem měřil jejich elektrický odpor a z naměřených hodnot vypracoval závislost elektrického odporu na podmínkách vytvrzování. Při druhé jsem vzorky umisťoval pod mikroskop s volitelným zvětšením. V této části jsem měřil šířku natištěných vzorů a porovnával ji se šířkou motivu v sítu. Dále jsem vizuálně zkoumal povrch vrstev z nových a starých past a zaznamenal několik vad vzorků a také síta, které vznikají při ručním sítotisku nebo souvisí se stářím pasty. Při třetí sérii měření jsem vkládal vzorky pod měřicí hrot, jenž přejížděl přes vrstvy a celkem detailně zaznamenával nerovnosti jejich povrchu.

## 4.5.1. Elektrický odpor

Po vytvoření sady vzorků, na kterou byla použita jedna ze čtyř výše zmíněných past jsem se přesunul k měřicímu přístroji, abych jednotlivé motivy na vzorcích proměřil a zaznamenal jejich elektrický odpor. Takto jsem postupoval při měření všech čtyř sad vzorků. Jako měřicí přístroj jsem použil digitální multimetr 34401A od firmy HP, který měřil elektrický odpor s přesností na tři desetinná místa.



Obr. 19 Digitální multimetr použitý na měření elektrického odporu

Před samotným měřením jsem očekával, že podmínky vytvrzování vrstev na vytvořených vzorcích budou mít dopad na jejich vlastnosti. Proto jsem byl přesvědčen o tom, že při vytvoření grafů z naměřených hodnot bude možno pozorovat závislost elektrického odporu na teplotě a době při vytvrzování.

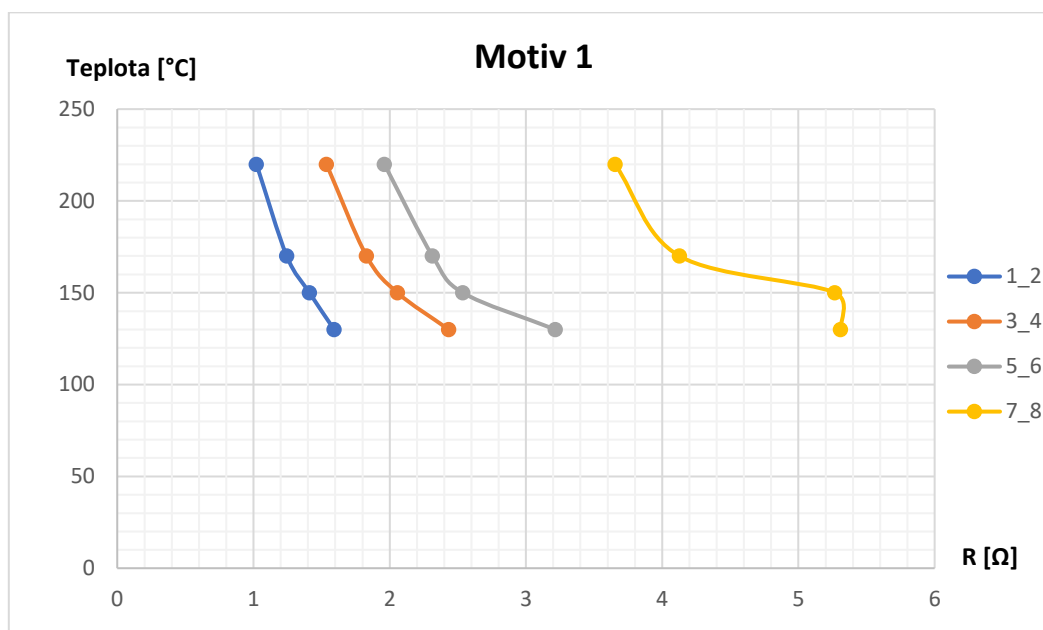
Všechny naměřené hodnoty jsem zanesl do tabulek. Kvůli velkému počtu hodnot pro každý vzor a jejich rozdílným velikostem jsem vytvořil tabulky průměrných hodnot s odečtenou korekční hodnotou odporu na použitých měřicích elektrodách. Tyto hodnoty jsem následně použil pro vytvoření grafů. Tabulky všech naměřených hodnot lze nalézt na konci práce mezi přílohami.



## Vzorky z pasty CSP-3110D (Ag – stará)

Podmínky výpalu	Motiv 1			
	1_2	3_4	5_6	7_8
130 °C / 60 min	1,592	2,433	3,216	5,310
150 °C / 30 min	1,411	2,057	2,537	5,268
170 °C / 30 min	1,244	1,830	2,314	4,127
220 °C / 20 min	1,022	1,536	1,961	3,654

Tabulka č. 1 Průměrné hodnoty elektrického odporu pro motiv 1 (CSP-3110D)

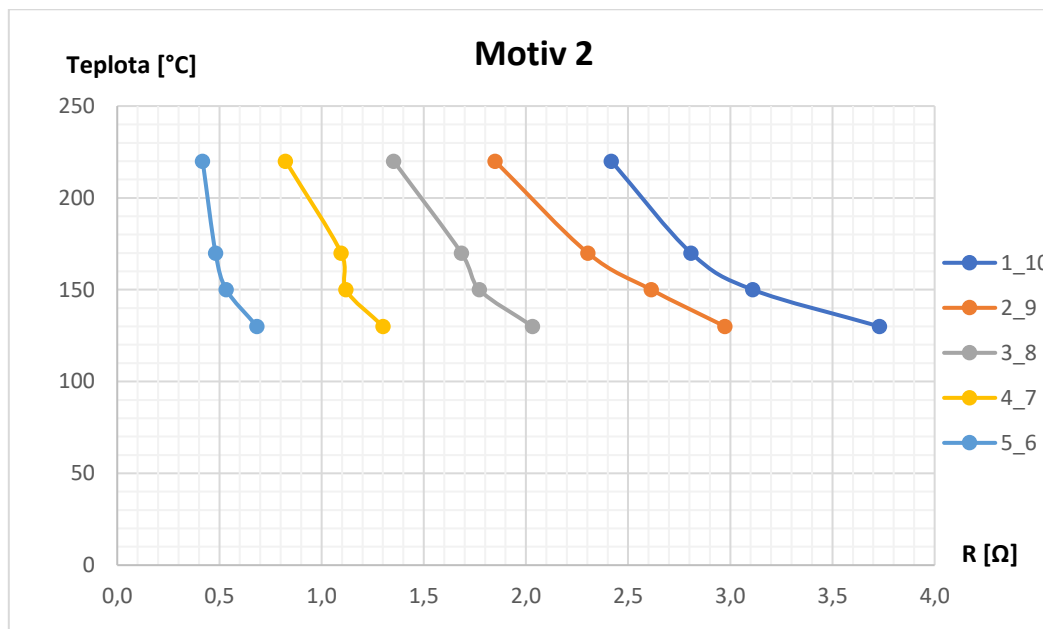


Obr. 20 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 1 (CSP-3110D)

Z grafu pro motiv 1 si můžeme povšimnout, jak se mění elektrický odpor také v závislosti na šířce natištěného kontaktu. To nám znázorňuje strmost vynesené křivky. Při bližším pohledu lze vidět, že se zmenšující se šířkou kontaktu je při vytvrzení za nižších teplot elektrický odpor podstatně vyšší. Křivka pro kontakt 7\_8 se při nižších hodnotách teploty liší od ostatních. To může být způsobeno hlavně špatnou kvalitou vytvořených kontaktů, špatným měřením a průměrováním hodnot. U past může docházet vlivem působení času či chemických reakcí (např. při špatném skladování) k degradaci materiálu a ta se může podepsat na vlastnostech vytvářených vrstev. Dále je třeba zdůraznit, že tenčí motivy se ne vždy podařilo dobře natisknout, neboť se u nich oka síta snadněji ucpávala.

Podmínky výpalu	Motiv 2					$\Omega$
	1_10	2_9	3_8	4_7	5_6	
130 °C / 60 min	3,730	2,974	2,033	1,301	0,684	
150 °C / 30 min	3,110	2,613	1,772	1,119	0,534	
170 °C / 30 min	2,808	2,303	1,684	1,096	0,481	
220 °C / 20 min	2,418	1,849	1,353	0,824	0,418	

Tabulka č. 2 Průměrné hodnoty elektrického odporu pro motiv 2 (CSP-3110D)

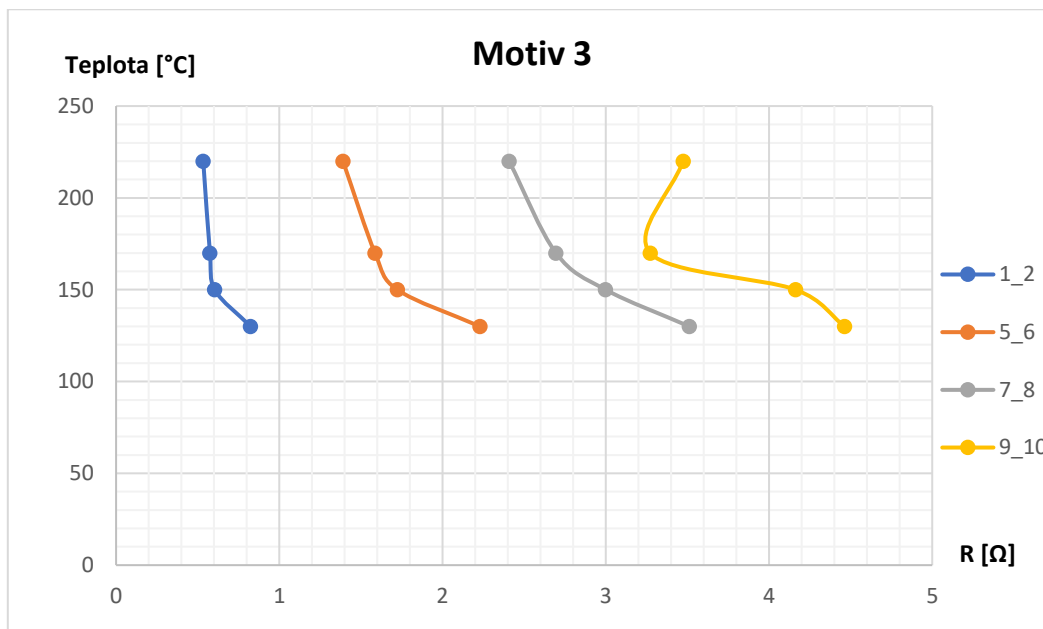


Obr. 21 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 2 (CSP-3110D)

U motivu 2 lze stejně jako u motivu 1 pozorovat, že s klesající teplotou při vytvrzování se zvyšuje hodnota elektrického odporu. Na rozdíl od předchozího motivu se zde již neměnila šířka kontaktů, ale jejich délka. Stejně ale můžeme pozorovat podobnou závislost jako se předtím projevila u motivu 1. Zde dochází s klesající teplotou vytvrzování při prodlužování dráhy vodiče k rapidnějšímu nárůstu elektrického odporu.

Podmínky výpalu	Motiv 3			
	1_2	5_6	7_8	9_10
130 °C / 60 min	0,824	2,229	3,512	4,463
150 °C / 30 min	0,604	1,723	2,999	4,163
170 °C / 30 min	0,575	1,586	2,695	3,272
220 °C / 20 min	0,534	1,390	2,408	3,474

Tabulka č. 3 Průměrné hodnoty elektrického odporu pro motiv 3 (CSP-3110D)



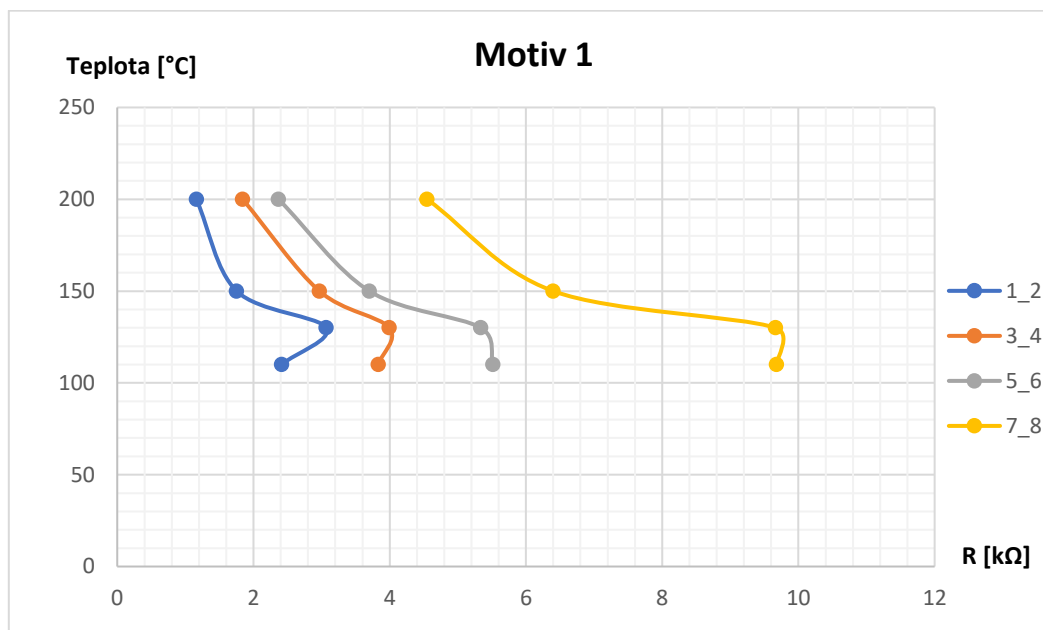
Obr. 22 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 3 (CSP-3110D)

U motivu 3 můžeme, stejně jako u motivů předchozích, pozorovat zvyšující se hodnotu elektrického odporu při snižující se teplotě vytvrzování. Závislost odporu na rozměrech vodičů zde však nelze nijak spolehlivě odvozovat, neboť je každý jinak tvarován. Pro vodič 9\_10 můžeme vidět lišící se křivku závislosti. To může být opět způsobeno špatnou kvalitou vytváření vrstev nebo použité pasty. Při srovnání křivky vodiče 1\_2 a křivky vodiče 5\_6 z motivu jedna vidíme že jsou téměř shodné. Vzhledem k jejich téměř stejným rozměrům to dává smysl.

## Vzorky z pasty CSP-3225 (C - stará)

Podmínky výpalu	Motiv 1			
	1_2	3_4	5_6	7_8
110 °C / 50 min	2,411	3,833	5,514	9,677
130 °C / 30 min	3,066	3,992	5,336	9,664
150 °C / 20 min	1,753	2,968	3,701	6,400
200 °C / 40 min	1,162	1,841	2,368	4,549

Tabulka č. 4 Průměrné hodnoty elektrického odporu pro motiv 1 (CSP-3225)

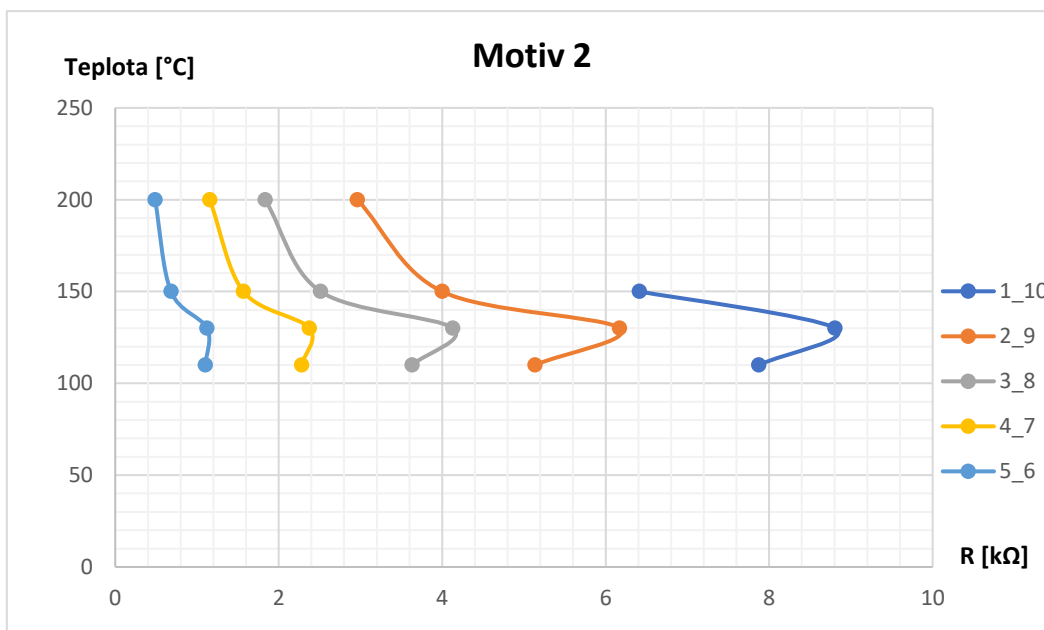


Obr. 23 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 1 (CSP-3225)

Nyní již máme pastu složením odlišnou (uhlíkovou) od té první, takže lze očekávat odlišné křivky. Hned první pohled na graf motivu 1 to potvrzuje. Do 130 °C (zlomová teplota) jsou sice charakteristiky velmi podobné jako u předchozí pasty, kdy se snižující se teplotou hodnota elektrického odporu roste. Při dalším snižování vytvrzovací teploty však již odpor klesá. Další věc, které si můžeme všimnout je, že podobně jako u předchozí pasty nám elektrický odpor rapidněji narůstá se snižující se šířkou vodiče. Od zlomové teploty, kdy hodnota odporu klesá, se tato závislost obrací a s dalším snižováním teploty hodnota odporu klesá pomaleji se zmenšující se šířkou vodiče.

Podmínky výpalu	Motiv 2					kΩ
	1_10	2_9	3_8	4_7	5_6	
110 °C / 50 min	7,875	5,136	3,632	2,281	1,104	
130 °C / 30 min	8,806	6,171	4,131	2,375	1,123	
150 °C / 20 min	6,413	3,999	2,512	1,568	0,682	
200 °C / 40 min	-	2,963	1,834	1,156	0,487	

Tabulka č. 5 Průměrné hodnoty elektrického odporu pro motiv 2 (CSP-3225)

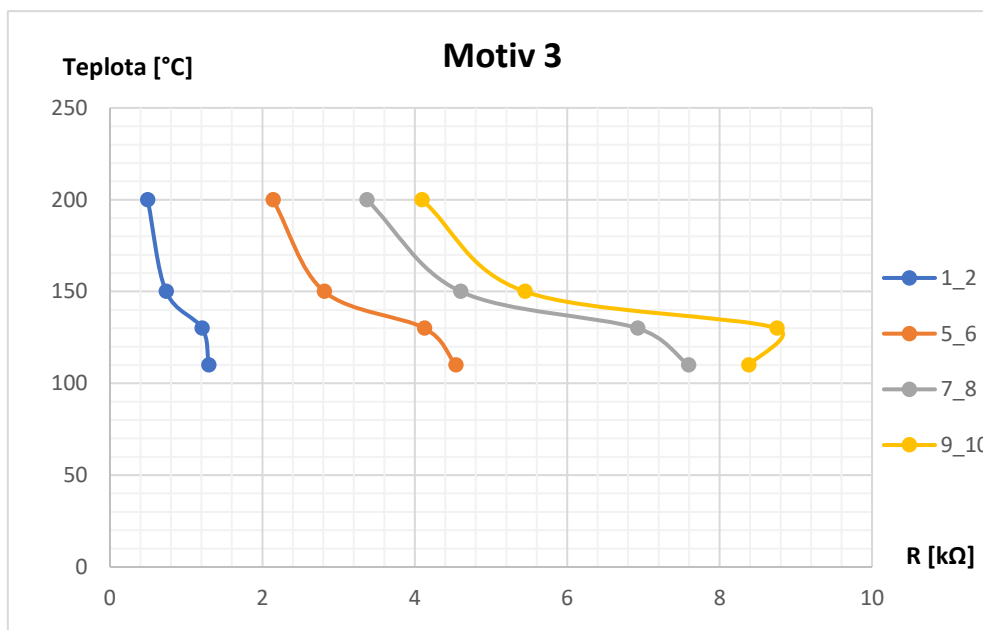


Obr. 24 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 2 (CSP-3225)

U motivu 2 lze, stejně jako u motivu 1, pozorovat, že s klesající teplotou při vytvrzování se zvyšuje hodnota elektrického odporu až do zlomové teploty. Poté se jeho hodnota s dalším snižováním teploty zmenšuje. Podobně jako u předchozího motivu i zde můžeme pozorovat další závislost spojenou s rozměry vodiče, kdy dochází s klesající teplotou vytvrzování při prodlužování dráhy vodiče k rapidnějšímu nárůstu elektrického odporu.

Podmínky výpalu	Motiv 3				kΩ
	1_2	5_6	7_8	9_10	
110 °C / 50 min	1,296	4,540	7,591	8,383	
130 °C / 30 min	1,209	4,128	6,923	8,753	
150 °C / 20 min	0,736	2,812	4,601	5,444	
200 °C / 40 min	0,495	2,138	3,370	4,094	

Tabulka č. 6 Průměrné hodnoty elektrického odporu pro motiv 3 (CSP-3225)



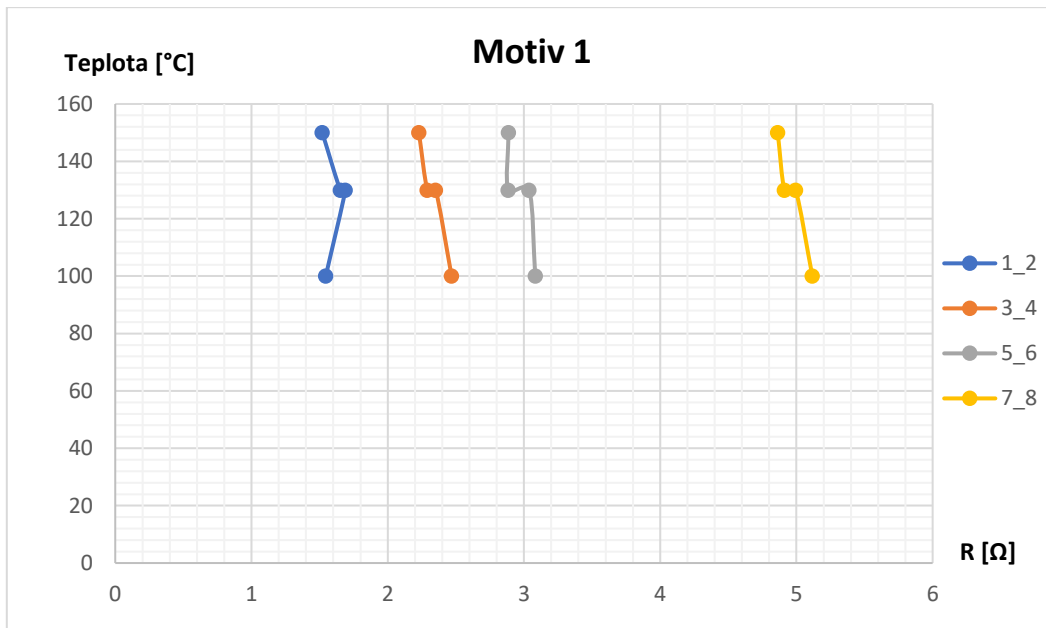
Obr. 25 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 3 (CSP-3225)

U motivu 3 lze sledovat závislost stejnou jako u motivů předchozích, a to, že s klesající teplotou vytvrzování stoupá hodnota elektrického odporu a s prodlužující se dráhou kontaktu je tento nárůst rychlejší. Oproti předchozím motivům již zde však nedochází při snižování teploty pod 130 °C ke snižování odporu. Pouze vodič 9\_10 tento zlom vykazuje. Křivky kontaktů 1\_2 a 5\_6 z motivu 2 jsou opět velmi podobné, stejně jako tomu bylo u předchozí pasty.

## Vzorky z pasty Paron-910 Series

Podmínky výpalu	Motiv 1				$\Omega$
	1_2	3_4	5_6	7_8	
100 °C / 30 min	1,545	2,469	3,083	5,117	
130 °C / 30 min	1,689	2,352	3,038	4,994	
130 °C / 60 min	1,652	2,291	2,885	4,913	
150 °C / 25 min	1,520	2,229	2,887	4,863	

Tabulka č. 7 Průměrné hodnoty elektrického odporu pro motiv 1 (Paron-910 Series)

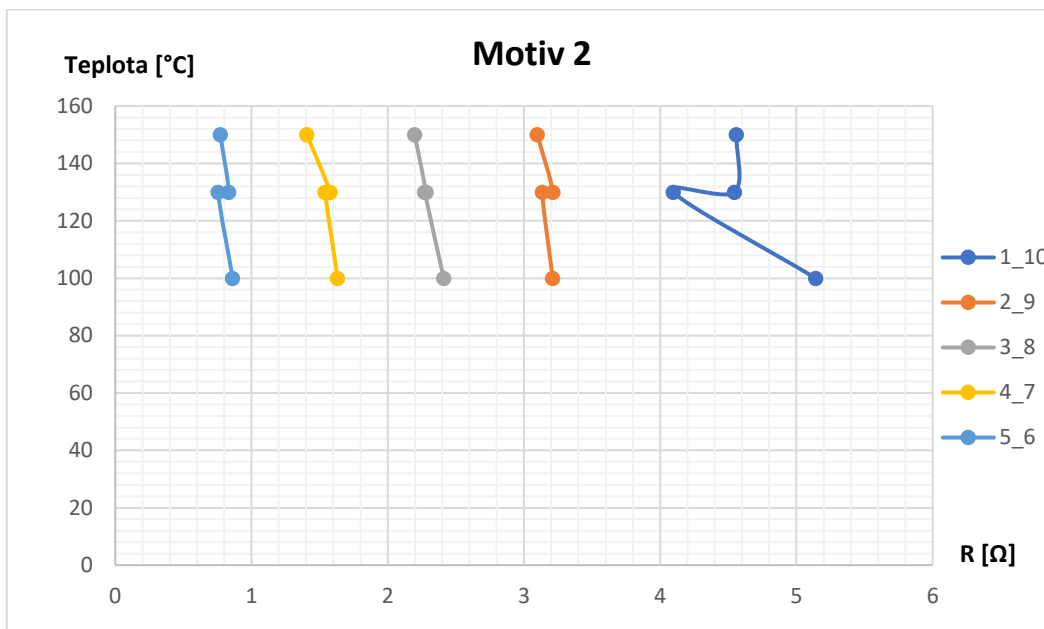


Obr. 26 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 1 (Paron-910 Series)

Zde můžeme pozorovat, že vzorky zhotovené z této pasty vykazují velmi malou závislost jak na teplotě a době při vytvrzování, tak na rozměrech vodiče.

Podmínky výpalu	Motiv 2					$\Omega$
	1_10	2_9	3_8	4_7	5_6	
100 °C / 30 min	5,142	3,211	2,411	1,632	0,862	
130 °C / 30 min	4,096	3,136	2,272	1,541	0,756	
130 °C / 60 min	4,545	3,213	2,282	1,579	0,832	
150 °C / 25 min	4,560	3,098	2,198	1,407	0,771	

Tabulka č. 8 Průměrné hodnoty elektrického odporu pro motiv 2 (Paron-910 Series)



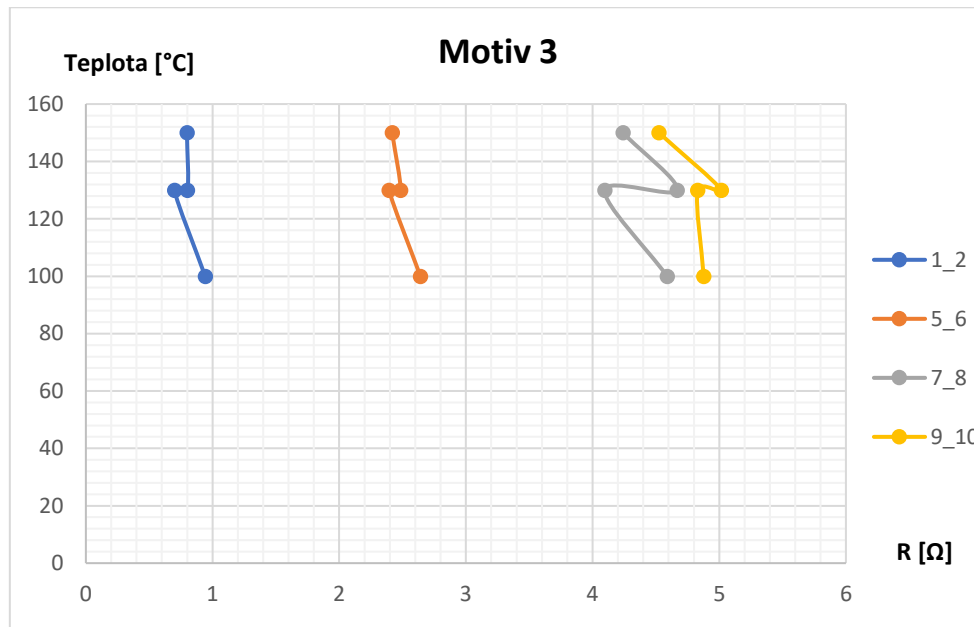
Obr. 27 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 2 (Paron-910 Series)

Stejně jako u předchozího motivu i zde můžeme pozorovat, že závislost elektrického odporu na rozměrech vodiče a podmínkách vytvrzování je velmi malá. Výjimku tvoří křivka vodiče 1\_10, který je oproti ostatním již o poznání delší. Podobně je tomu tak i u dalšího motivu.



Podmínky výpalu	Motiv 3			
	1_2	5_6	7_8	9_10
100 °C / 30 min	0,942	2,641	4,589	4,877
130 °C / 30 min	0,699	2,394	4,096	4,830
130 °C / 60 min	0,801	2,484	4,667	5,017
150 °C / 25 min	0,798	2,418	4,240	4,524

Tabulka č. 9 Průměrné hodnoty elektrického odporu pro motiv 3 (Paron-910 Series)



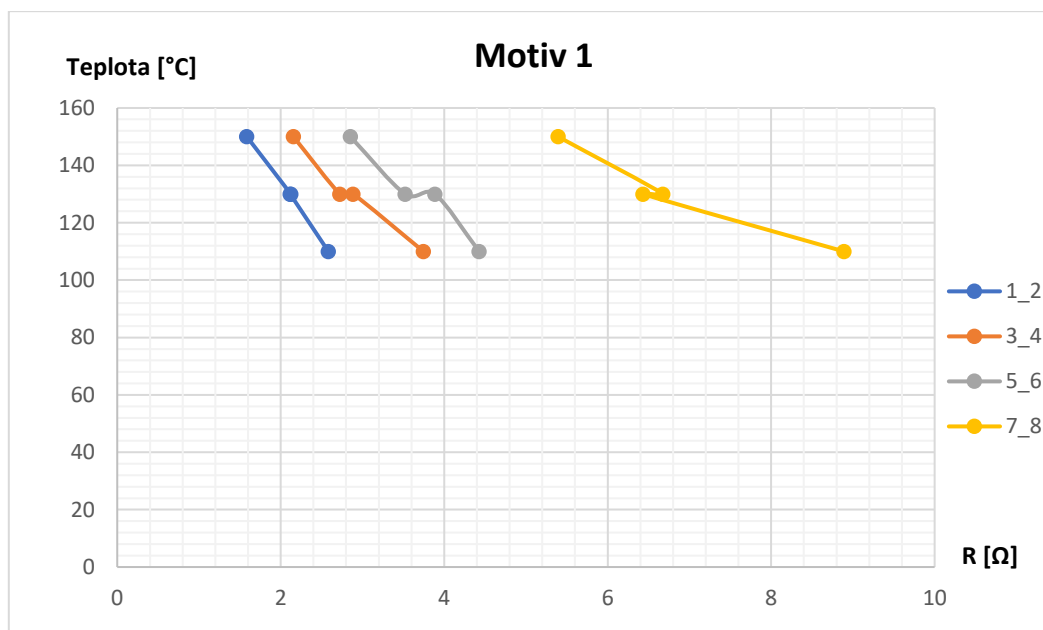
Obr. 28 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 3 (Paron-910 Series)

Stejně jako u předchozího motivu i zde můžeme vidět, že křivky delších vodičů (7\_8 a 9\_10) již vykazují závislost elektrického odporu na době vytvrzování. Z toho lze usuzovat, že pro delší vodiče vytvořené touto pastou již možná hraje doba vytvrzování větší relevanci než pro vodiče kratší.

## Vzorky z pasty Paron-920

Podmínky výpalu	Motiv 1				kΩ
	1_2	3_4	5_6	7_8	
110 °C / 60 min	2,583	3,746	4,428	8,890	
130 °C / 30 min	2,116	2,884	3,886	6,434	
130 °C / 60 min	2,123	2,725	3,523	6,677	
150 °C / 30 min	1,585	2,155	2,852	5,393	

Tabulka č. 10 Průměrné hodnoty elektrického odporu pro motiv 1 (Paron-920)

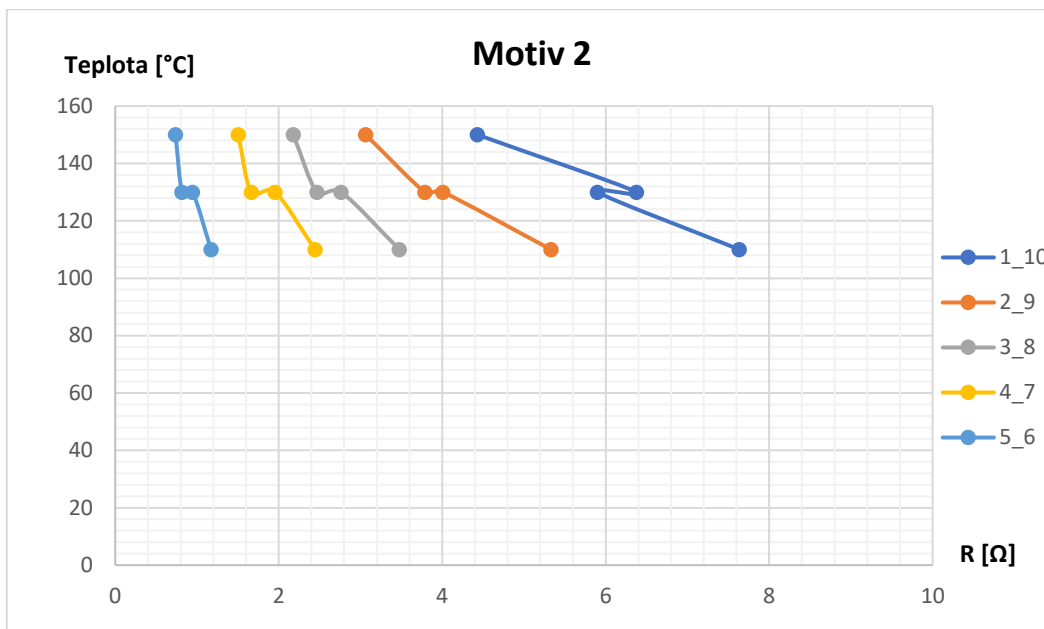


Obr. 29 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 1 (Paron-920)

Vzorky s motivem 1 z této pasty vykazují, stejně jako u prvních dvou past, nárůst elektrického odporu se snižující se teplotou při vytvrzování. Stejně tak tomu je při snižování šířky vodiče, kdy hodnota odporu stoupá rapidněji.

Podmínky výpalu	Motiv 2					kΩ
	1_10	2_9	3_8	4_7	5_6	
110 °C/ 60 min	7,636	5,332	3,477	2,445	1,172	
130 °C / 30 min	5,900	4,009	2,764	1,957	0,947	
130 °C / 60 min	6,379	3,789	2,468	1,665	0,818	
150 °C / 30 min	4,432	3,064	2,178	1,505	0,737	

Tabulka č. 11 Průměrné hodnoty elektrického odporu pro motiv 2 (Paron-920)

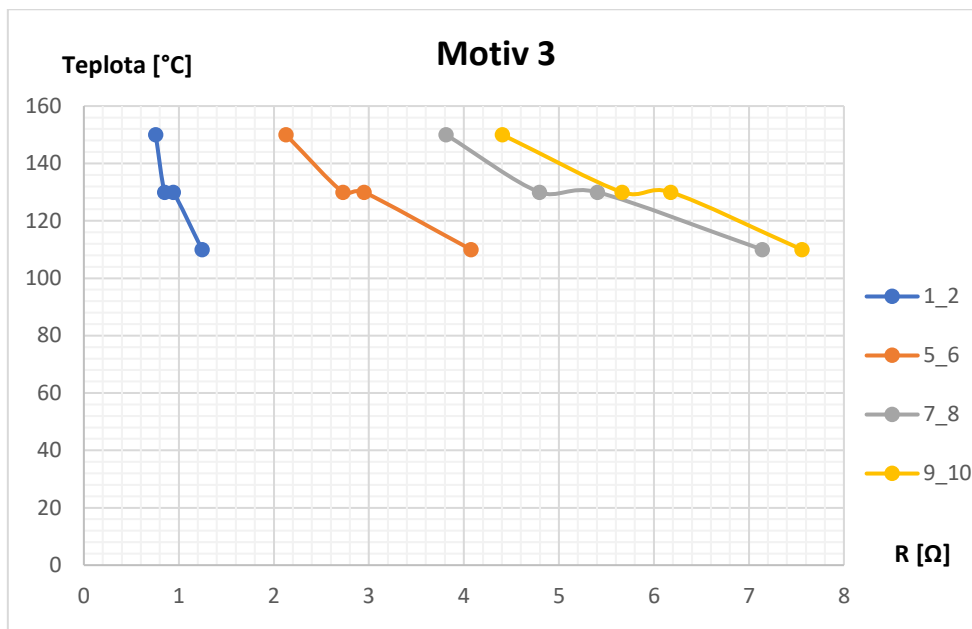


Obr. 30 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 2 (Paron-920)

U motivu 2 lze také pozorovat, že hodnota elektrického odporu roste se snižující se teplotou při vytvrzování. Dále dochází k rychlejšímu růstu hodnoty odporu se zvětšující se délkou vodiče.

Podmínky výpalu	Motiv 3				kΩ
	1_2	5_6	7_8	9_10	
110 °C / 60 min	1,244	4,075	7,140	7,557	
130 °C / 30 min	0,940	2,947	5,404	6,177	
130 °C / 60 min	0,850	2,726	4,795	5,664	
150 °C / 30 min	0,756	2,127	3,812	4,405	

Tabulka č. 12 Průměrné hodnoty elektrického odporu pro motiv 3 (Paron-920)



Obr. 31 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 3 (Paron-920)

Stejné závislosti jako u motivu 2 vykazují i vzorky s motivem 3. Při pohledu zpět na předchozí motivy můžeme konstatovat, že uhlíková pasta Paron vykazuje oproti stříbrné pastě Paron větší závislost na době vytvrzení při stejné teplotě.

## 4.5.2. Měření pod mikroskopem

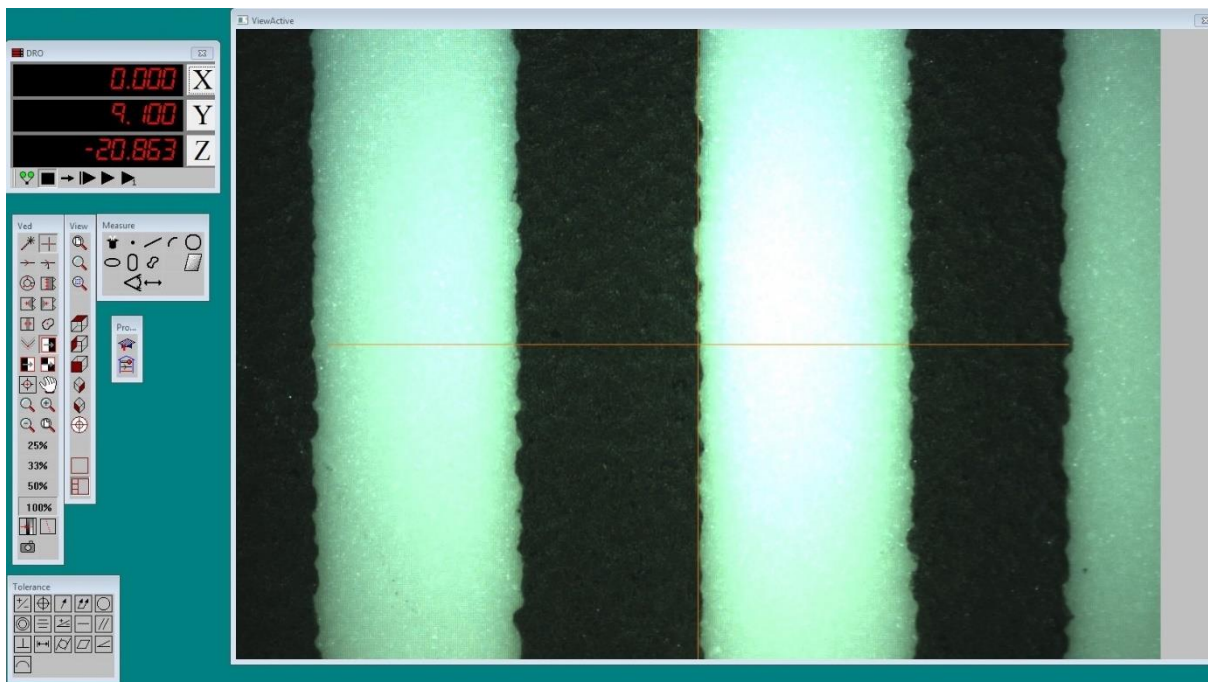
Po proměření elektrických odporů všech sad vzorků jsem se přesunul k mikroskopu, kde jsem zkoumal vybrané vzorky. Cílem tohoto měření bylo změřit šířku vodičů vytvořených pomocí motivu 1 a porovnat ji se šířkou motivu v sítu, dále pak porovnat detailní obrázek povrchu staré a nové pasty, a nakonec se zaměřit na nedokonalosti a vady vytvořených vzorků. K měření jsem používal mikroskop Hawk značky Vision Engineering se zabudovanou kamerou, LED osvětlením a podsvícenou podložkou posuvnou ve všech třech osách. Ten byl připojen k počítači, na kterém byl nainstalován program, v němž se zobrazoval pohled zabudované kamery a obsahoval velké množství funkcí pro práci se zkoumanými vzorky.



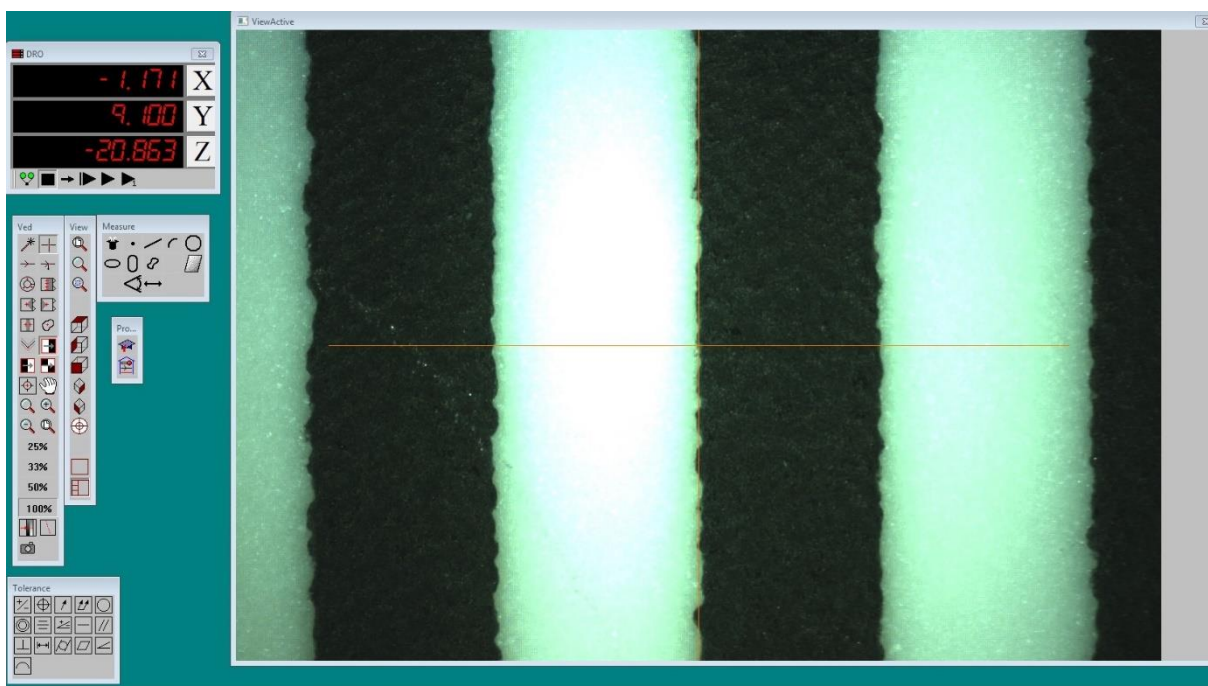
Obr. 32 Mikroskop s kamerou

### **Měření rozměrů vytvořených vodičů**

Na dvou obrázcích níže si lze prohlédnout, jak měření probíhalo a co jsem k němu používal. Použité měřicí prvky byly: zaměřovací kříž (oranžový křížek) a ukazatel posunutí podložky mikroskopu ve všech třech osách, který ukazoval posunutí v milimetrech s přesností na tři desetinná místa (v levém horním rohu). Samotné měření šířky vodiče pak probíhalo tak, že jsem nejprve pomocí centrovacích šroubů na podložce nastavil zaměřovací kříž na okraj vodiče a tlačítkem X jsem vynuloval měření posunu v příslušné ose (Obr. 33). Poté jsem pomocí centrovacího šroubu posunul podložku tak aby se druhý okraj vodiče přesunul pod zaměřovací kříž. Zobrazenou hodnotu jsem poté zapsal do tabulky (Obr. 34). Analogicky jsem postupoval při měření všech zkoumaných vzorků.



Obr. 33 Měření šířky 1



Obr. 34 Měření šířky 2



Všechny naměřené hodnoty jsem zapsal do tabulky, kterou lze vidět níže, abych mohl porovnat, jak moc se šířka vytvořených vodičů z motivu 1 liší od šířky vodičů motivu v sítu. Pro názornost jsem vytvořil tabulku druhou, kde je znázorněno, o kolik procent je šířka vytvořeného vodiče větší než šířka vodiče v sítu. Z výsledků lze sledovat, že čím užší vodič tiskneme tím větší je poměr šířky vodiče vytvořeného a šířky motivu v sítu bez ohledu na to, jakou pastu použijeme.

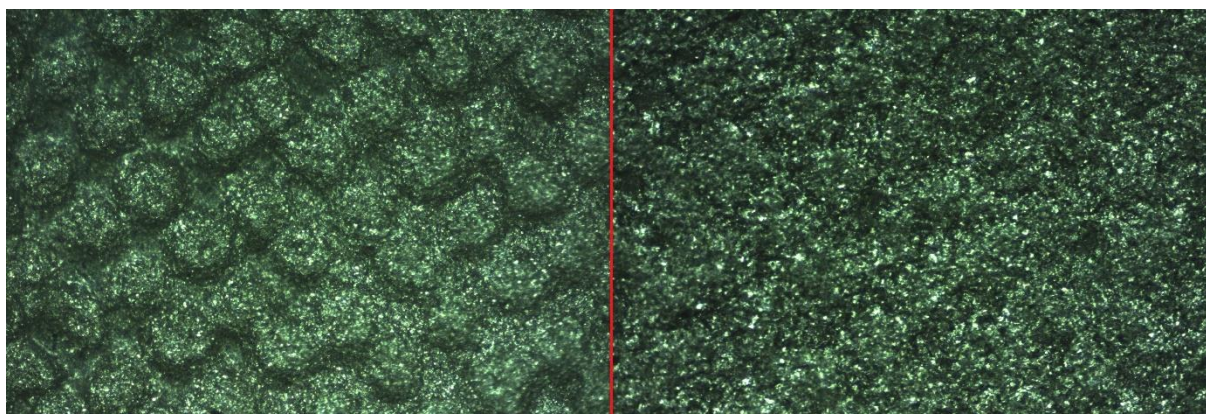
Pasta	Motiv 1					
	1_2	3_4	5_6	7_8	9_10	
CSP-3110D	1,546	1,068	0,840	0,884	0,857	mm
CSP-3225	1,780	1,333	1,043	0,770	0,680	
Paron-910 Series	1,686	1,463	1,244	0,877	0,670	
Paron-920	1,933	1,450	1,281	1,025	0,666	
<b>Rozměry v sítu</b>	1,5	1	0,8	0,5	0,3	

Pasta	Motiv 1					
	1_2	3_4	5_6	7_8	9_10	
CSP-3110D	3	7	5	77	186	%
CSP-3225	19	33	30	54	127	
Paron-910 Series	12	46	56	75	123	
Paron-920	29	45	60	105	122	

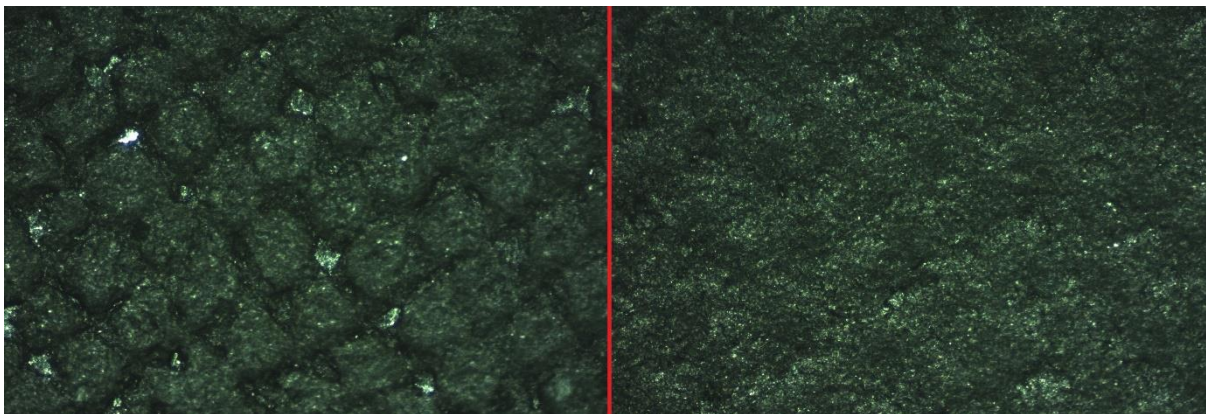
Tabulky č. 13 a 14 Rozměry jednotlivých změřených vodičů motivu 1 a procentuální odlišnost od rozměrů v sítu

### Porovnání povrchu vrstvy ze staré a nové pasty

Další část tohoto měření spočívala v detailnějším prozkoumání povrchu vybraných vzorků a poukázání na rozdílnosti mezi vzorky vytvořenými za pomoci staré a nové pasty. Na Obr. 35 můžeme pozorovat vzorky vytvořené ze stříbrných past. Již na první pohled lze konstatovat, že se od sebe vzorky liší. Na vzorku vlevo, jenž je vytvořen ze staré pasty můžeme vidět obtisk síta, zatímco na vzorku zhotoveného z pasty nové již tento obtisk vidět nelze. To je s největší pravděpodobností způsobeno degradací pasty (pravděpodobně to bude degradace pojivové nebo tavivové složky). Na Obr. 36 jsou zobrazeny vzorky vytvořené z uhlíkových past. I tyto vzorky vykazují podobné jevy jako vzorky z past stříbrných, zde však u nové pasty vidíme jemný náznak obtisknutého síta a u pasty staré vidíme ve místech obtisku síta dokonce malé dírký. Z toho můžeme soudit, že stříbrné pasty mají pravděpodobně větší viskozitu než pasty uhlíkové.



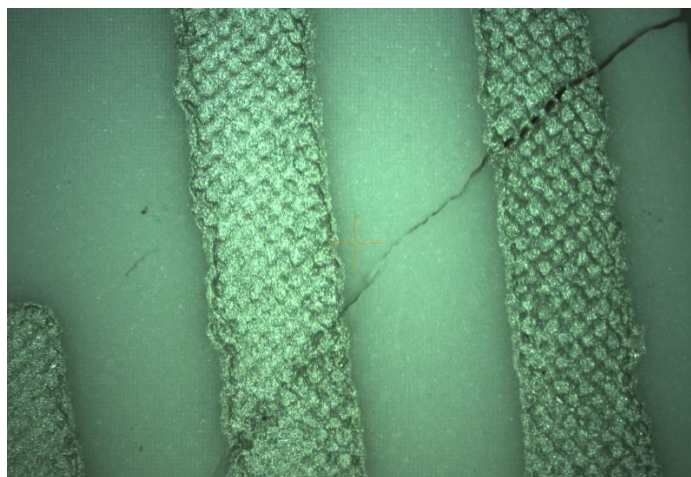
Obr. 35 Povrch vodiče z pasty CSP-3110D (Ag stará) vlevo a z pasty Paron-910 Series (Ag nová) vpravo



Obr. 36 Povrch vodiče z pasty CSP-3225 (C stará) vlevo a z pasty Paron-920 (C nová) vpravo

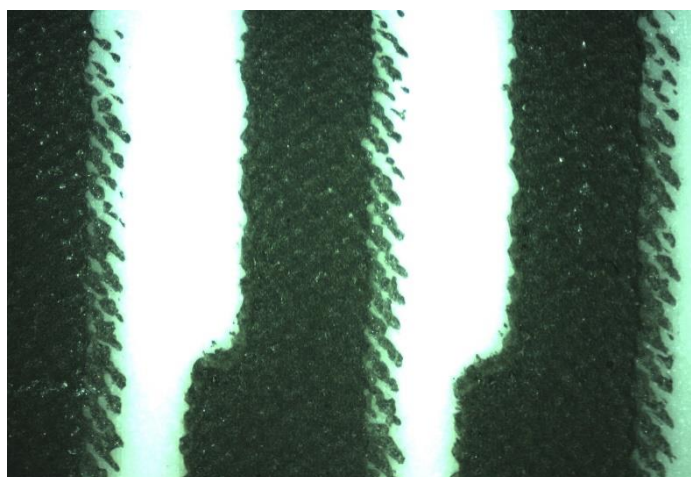
### Vady a nedokonalosti

Při tvorbě vzorků tlustých vrstev pomocí ručního sítotisku je zvýšená pravděpodobnost výskytu nedokonalostí. V této části lze vidět několik nedokonalostí, které se mohou negativně projevit na vlastnostech a funkci vytvořených vrstev.



Obr. 37 Prasklina v keramické podložce

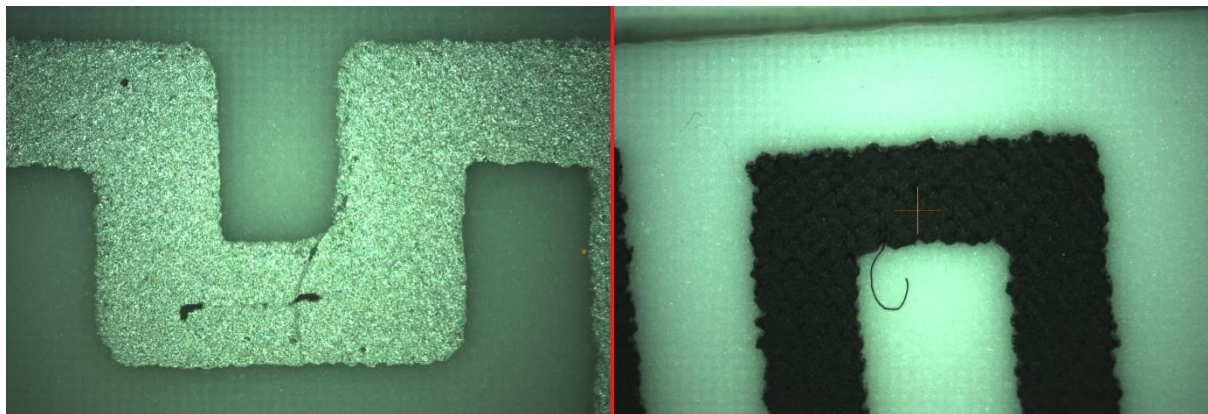
Na Obr. 37 můžeme vidět prasklinu na keramické podložce. Ta mohla vzniknout buď špatnou manipulací se vzorkem před nanesením nebo při nanášení vrstvy, anebo při vytvrzování v peci. Na obou vodičích si můžeme všimnout, že prasklina porušila jejich celistvost a ta se značně podepíše na jejich elektrických vlastnostech.



Obr. 38 Rozmáznutí vrstvy posunem podložky/síta

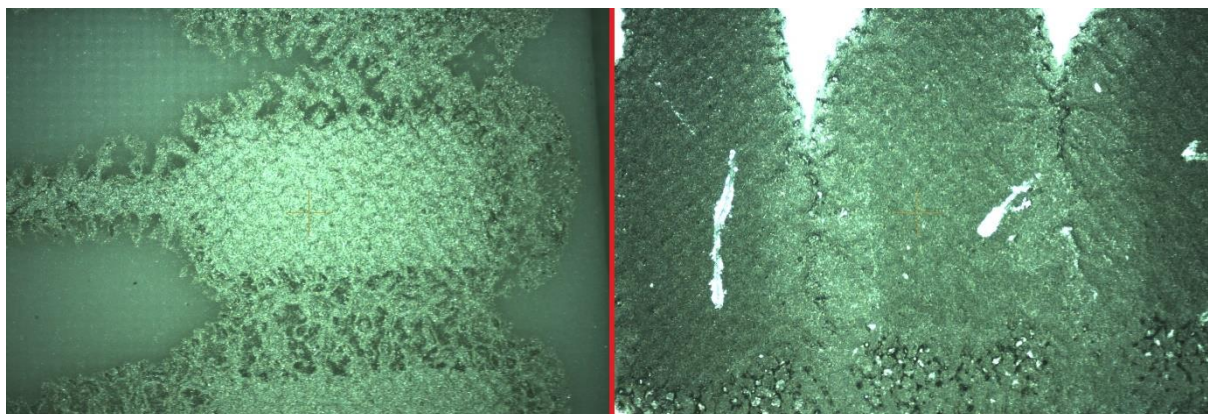


Na Obr. 38 je zobrazeno rozmáznutí vodičů, které je způsobeno pravděpodobně posunem podložky anebo síta. Posun mohl být způsoben buď špatným utažením podložky na destičky ke kostře zařízení pro ruční sítotisk, posunem keramické destičky, nedokonalým utažením rámu se sítem k zařízení pro sítotisk, nebo špatným napnutím síta v rámu. Vzhledem k tomu, že zařízení pro sítotisk i rám se sítem, jenž jsem používal, byly již poměrně staré, přikláněl bych se zejména ke špatnému napnutí síta v rámu a povolené podložce pro keramické destičky.



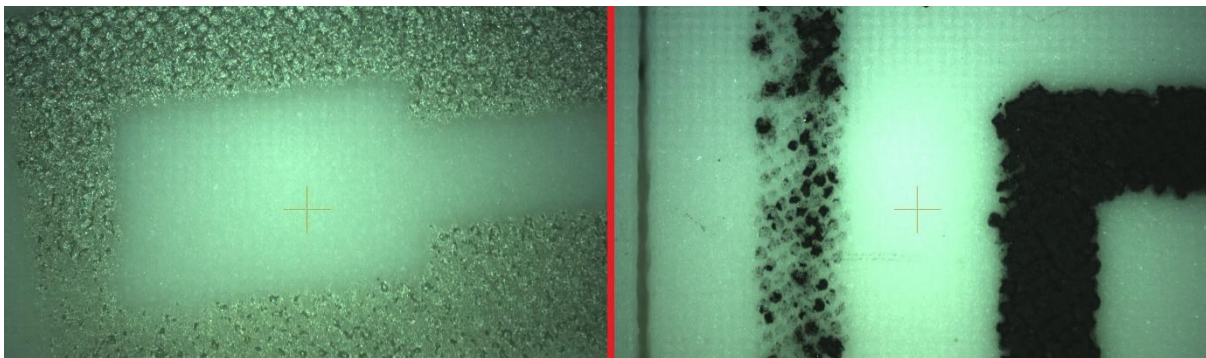
Obr. 39 Nežádoucí předmět ve vrstvě

Na Obr. 39 můžeme vidět nežádoucí látky/předměty ve vytvořených vzorcích. Napravo je to vlas nebo chlup a nalevo je to chlup a zřejmě nějaké prachové částice. Tyto předměty se tam mohly dostat vinou špatného očištění podložek, nebo se tam mohly dostat při přiklápění síta, neboť jsme při měření často otvírali okna a průvan mohl způsobit víření prachu.



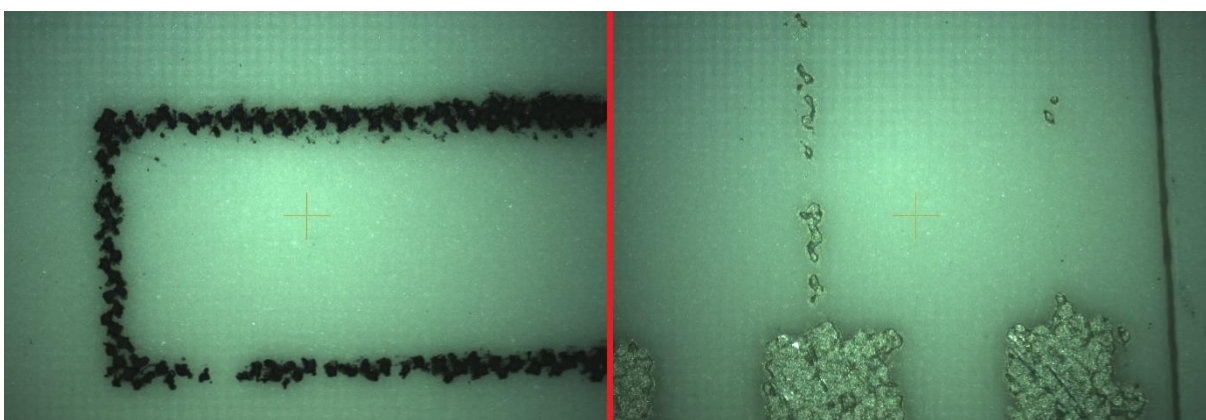
Obr. 40 Rozmáznutí/rozpítí vrstvy špatným přisednutím síta na podložku

Na Obr. 40 vidíme obrázky rozmáznutých kontaktů vytvořených vodičů. Ty zřejmě vznikly kvůli špatnému prohnutí a přisednutí síta na keramické destičky, takže se pasta při pohybu těrky jedním směrem dostala i pod zalepenou část síta a při pohybu těrky směrem zpět došlo k jejímu rozmáznutí. Na pravém obrázku si můžeme povšimnout škrábanců od měřících elektrod použitých na měření elektrického odporu.



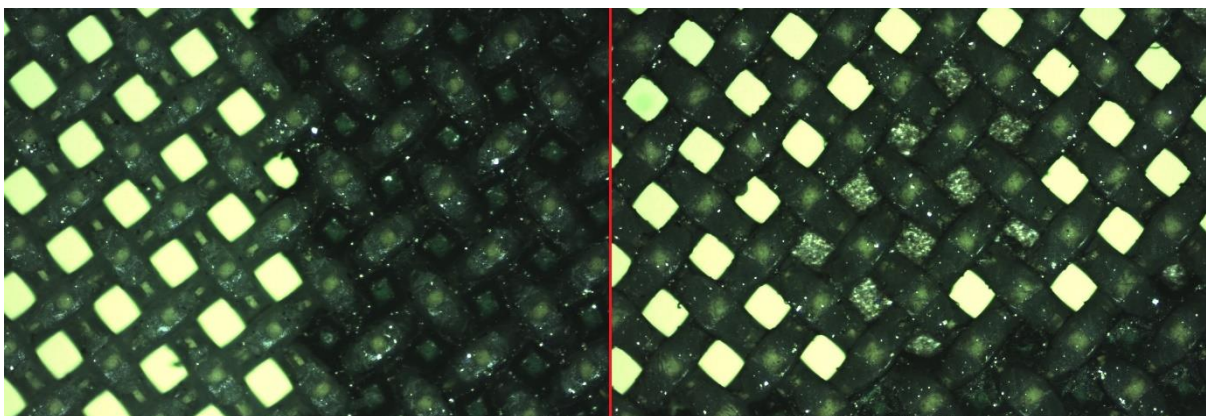
Obr. 41 Nedostatek pasty při vytváření vrstvy

Na Obr. 41 můžeme vidět vadu, jenž vzniká při nedostatku pasty nanesené před těrku. Velká část pasty totiž může zůstat na těrce, proto je třeba si během realizace vzorků neustále kontrolovat její dostatečné množství před těrku.



Obr. 42 Nedokončený vodič

Na Obr. 42 jsou zobrazeny dva vodiče, u nichž můžeme s jistotou říct, že jejich přerušení bylo způsobeno zalepením síta. To podporuje fakt, že se jedná o vodiče s nejmenší šířkou a jak jsem již psal výše v práci v sekci *Použité vzory*, u těch docházelo k ucpání síta nejčastěji. Na Obr. 43 níže je zobrazen detail, jak vypadají čistá oka síta (vlevo) a ucpaná oka síta (vpravo). Na levém obrázku můžeme vidět tmavou část síta. To je látka, pomocí které se síto zalepí a tím dojde k vytvoření požadovaných motivů.



Obr. 43 Ucpání ok síta



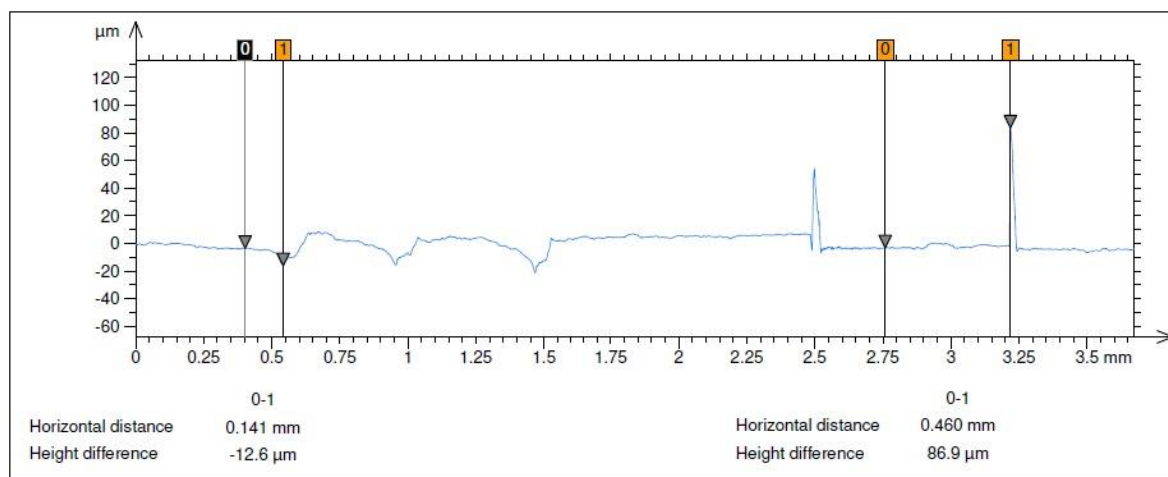
### 4.5.3. Měření tloušťky vrstev

Poté, co jsem doměřil na mikroskopu, jsem se přesunul k přístroji pro snímání povrchu měřených předmětů. Jednalo se o přístroj FORMTALYSURF 50 od firmy Taylor Hobson Precision. Měření probíhalo následovně. Zapnul jsem program na měření Taylor Hobson, pomocí příkazu v programu jsem vysunul měřící hrot směrem ven z přístroje, neboť při měření zajíždí měřící hrot směrem dovnitř. Vložil jsem vzorek a hrot jsem manuálně pomocí šroubu posunul směrem dolů tak, aby se dotýkal vzorku a jeho výchylka byla zhruba v polovině možného rozsahu. Následně jsem nastavil parametry měření (rychlost a délku) a nechal hrot přejet a proměřit povrch vzorku. Při měření bylo třeba snažit se nezpůsobovat žádné, byť sebemenší otřesy, neboť měřící hrot je velmi citlivý. Poté, co bylo měření dokončeno, se vytvořil soubor se zaznamenaným průběhem. Ten jsem následně exportoval do dalšího programu TalyProfile Gold, který slouží k úpravám a měřením zaznamenaných průběhů. Průběhy jsem pomocí operátorů Leveling a Form removing upravil (narovnal) tak, abych na něm mohl provést měření. Měřil jsem průměrnou tloušťku tlusté vrstvy za pomoci nastavení dvou referenčních rovin. Analogicky jsem postupoval při měření všech vybraných vzorků.



Obr. 44 Přístroj na měření tloušťky vrstev

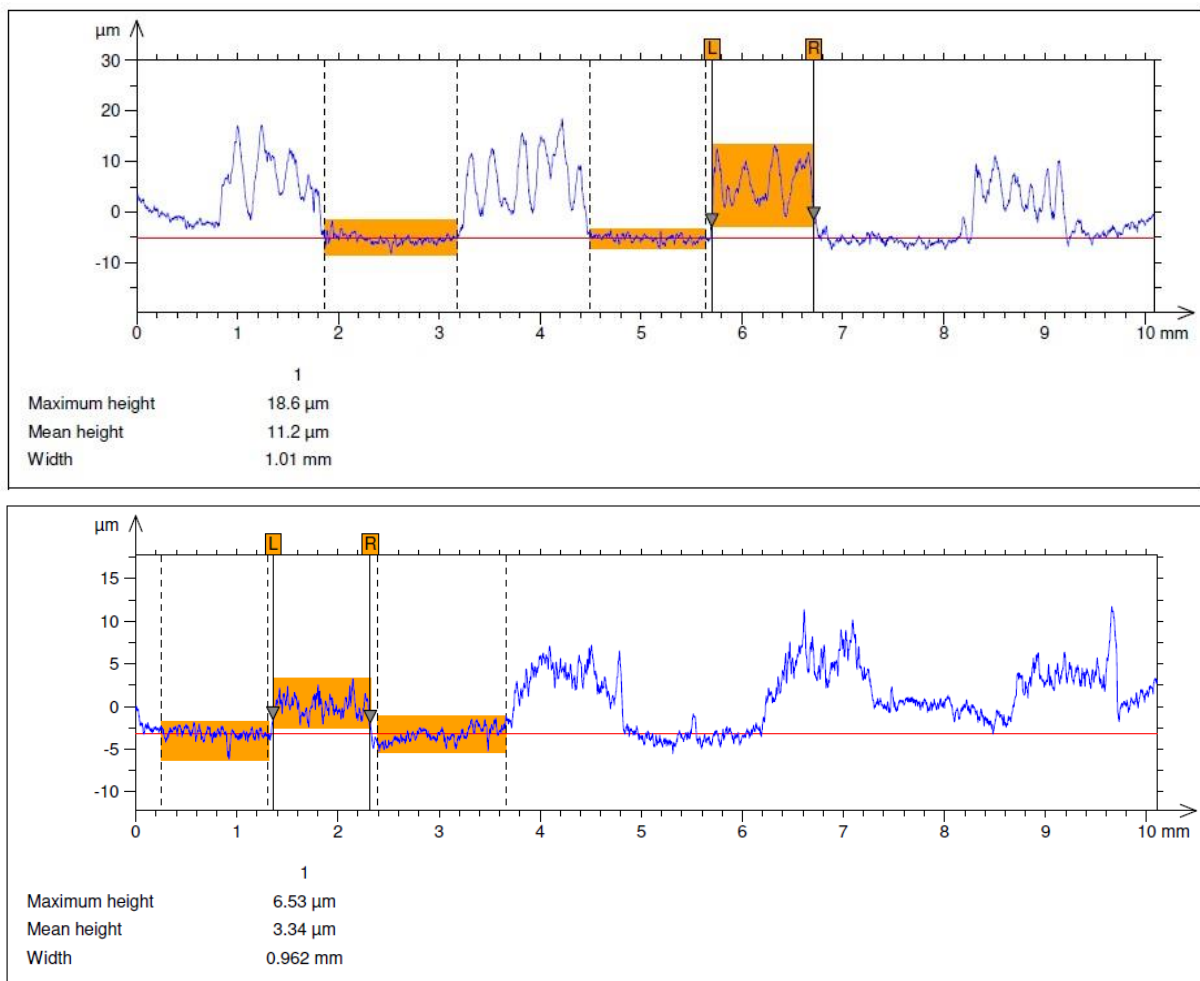
Na Obr. 45 můžete vidět, jak přesně se na vykreslení reliéfu snímaného vzorku projeví otřesy způsobené při měření. Položením ruky jsem vyvolal vychýlení o 12,6  $\mu\text{m}$  a prudkým bouchnutím do stolu to už bylo vychýlení o 86,9  $\mu\text{m}$ .



Obr. 45 Vliv otřesů na měření

Na Obr. 46 vidíme 2 ukázky jak probíhalo měření tloušťky z nasnímaného vzorku. Dvě žluté oblasti ohraničené přerušovanými čarami jsou referenční roviny. Ty nám pomohly nasnímaný průběh hrotu trochu narovnat. Poté jsme pomocí nastavitelných hranic L a R nastavili oblast průběhu, ze které bude počítána průměrná výška. Ta se nám objevila v levém dolním rohu. Stejným způsobem se měřily i ostatní vybrané vzorky.

Na Obr. 46 vidíme dva zaznamenané průběhy měřícího hrotu. Horní průběh byl zaznamenán u vzorku vytvořeného ze starší stříbrné pasty CSP-3110D. Dolní průběh náleží vzorku vytvořeného za použití novější stříbrné pasty Paron-910 Series. Již na první pohled je zřejmé, že při použití novější pasty je vytvořena vrstva, jejíž povrch je daleko hladší než povrch vrstvy z pasty staré. Tento fakt je stejně viditelný v předchozím měření na Obr. 35. Průběhy měřené u vzorků z obou uhlíkových past byly velmi podobné a jejich drsnost povrchu byla téměř stejná, proto zde vyobrazeny nejsou.



Obr. 46 Porovnání vzorků ze stříbrných past

CSP-3110D			CSP-3225		
Teplota [°C]	Tloušťka [μm]		Teplota [°C]	Tloušťka [μm]	
150	10,9	11,2	130	4,73	6,69
130	16,1	10,9	150	6,86	8,63
170	12,6	13,3	110	5,81	6,36
220	16,4	8,91	200	6,18	8,88

Paron-910 Series			Paron-920		
Teplota [°C]	Tloušťka [μm]		Teplota [°C]	Tloušťka [μm]	
130	3,34	6,95	130	7,66	6,64
130	3,34	5,27	130	5,78	7,12
150	4,29	5,35	110	5,33	5,90
100	4,21	5,75	150	4,70	9,28

Tabulka č. 15 Hodnoty tloušťky vybraných vzorků

Z tabulky zaznamenaných hodnot tloušťky můžeme vidět, že zde nelze odvodit jakoukoliv závislost tloušťky vytvořené vrstvy na teplotě při vytvrzování. Při pohledu na hodnoty tloušťky u vzorků ze stříbrných past však můžeme s jistotou říct, že stáří pasty rozhodně hraje roli, co se tloušťky týče. U uhlíkových past se hodnoty tloušťky od sebe moc neliší, takže v tomto ohledu stáří těchto past nemá moc velký dopad na tloušťku vytvářených vrstev.

## 5. Závěr

V teoretické části jsem nejprve popsal definici tlustých vrstev. Následoval popis a složení tlustovrstvých past. Dále jsem uvedl několik základních principů depozice past a následně tyto principy podrobněji popsal. Poté jsem popsal konečný proces realizace tlustých vrstev, a tím bylo vysoušení a následný výpal/vytvrzení. Jako další jsem v teoretické části popisoval tenké vrstvy a popsal základní způsoby jejich realizace. Poslední oddíl teoretické části jsem věnoval rozboru a srovnání vlastností (mechanických a elektrických) a struktury obou zmíněných vrstevových technologií.

Jako praktickou část jsem vytvořil několik sad vzorků, za použití různých past a nastavování různých teplot při vytvrzování, a následně jsem provedl několik měření, která jsem popsal a nyní provedu jejich celkové hodnocení.

Nejprve jsem provedl měření elektrického odporu. Při tom jsem u všech mnou vytvořených vzorků změřil jejich elektrický odpor a jeho hodnotu následně zanesl do tabulek. Vzhledem k velkému množství naměřených hodnot jsem se rozhodl jejich počet zredukovat za vytvoření tabulky průměrných hodnot odporu jednotlivých vodičů z každého motivu (Tabulky všech naměřených hodnot lze nalézt na konci práce v sekci Přílohy). Z těchto průměrných hodnot odporu jsem následně vytvořil grafy závislosti hodnoty elektrického odporu na teplotě při vytvrzování. Z grafů jasně vyplývá, že tam závislosti jsou. U starších past CSP-3110D a CSP-3225 můžeme vidět, že hodnota elektrického odporu se s klesající teplotou zvětšovala. U uhlíkové pasty CSP-3225 pak při poklesu teploty pod 130 °C začíná hodnota odporu opět klesat, zatímco u stříbrné pasty CSP-3110D jeho hodnota dále stoupá. Dále zde můžeme vidět, zejména u motivů 1 a 2 (vodiče mají stejný tvar pouze jejich délka a šířka se mění), že hodnota elektrického odporu závisí také na rozměrech vytvářených vodičů. Při postupných změnách jejich rozměrů se totiž hodnota odporu mění rapidněji (strmost křivek se mění). U novější stříbrné pasty Paron-910 Series již takové závislosti jako u past starších nevidíme. U druhé novější uhlíkové pasty Paron-920 jsou již závislosti na teplotě při vytvrzování a rozměrech vodičů opět zřetelné. U obou past Paron jsme navíc 2 sady vzorků vytvrzovali při stejné teplotě, ale při rozdílných dobách. Můžeme zde tedy pozorovat, zejména u pasty uhlíkové, že hodnota elektrického odporu záleží taktéž na době, po kterou jsou vzorky vytvrzovány.

Při dalším měření jsem vytvořené vzorky vkládal pod mikroskop se zabudovanou kamerou, zkoumal jejich povrch a vady a měřil jsem šířku vytvořených kontaktů, kterou jsem následně porovnával s faktickou šířkou vodičů v sítu, jenž jsem při realizaci vzorků používal. Z naměřených hodnot plyne, že se zmenšující se šířkou vytvářených vodičů se zvětšuje odchylka jejich šířky od šířky vodičů vytvořených v sítu. Při pohledu na obrázky povrchu nových a starých past můžeme jasně určit, která je stará a která nová. Na povrchu vrstev ze starých past je totiž velmi dobře viditelný otisk síta způsobený degradací složky pasty, jenž zajišťuje její viskozitou. Na povrchu vrstev z nových past již tento otisk síta viditelný není, a pokud ano, tak jen lehce. Na konci tohoto měření jsou umístěny obrázky vad a nedokonalostí, jenž jsem objevil na realizovaných vzorcích, spolu s popisem jejich možného vzniku.

Jako poslední je zde měření tloušťky vytvořených vodičů. Při tomto měření jsem zjistil, že nelze přesně stanovit jakoukoliv závislost tloušťky měřených vrstev na teplotě při jejich vytvrzování. Zato je zde dobře viditelné, že stáří stříbrných past zde určitou roli hraje. Mimo jiné se na obrázku naměřených průběhů měřicího hrotu přes vrstvy ze stříbrných past můžeme přesvědčit, že drsnost povrchu vrstvy staré pasty je mnohem větší než u vrstvy z pasty nové.

## Seznam obrázků

- Obr. 1: Ukázka struktury tlusté vodivé vrstvy se skelnou vazbou po výpalu/vytvrzení [2]
- Obr. 2: Princip sítotisku a) jednotlivé fáze tisku, b) detail přenosu pasty [2]
- Obr. 3: Různé struktury síťovin z polyesteru – a), b) a z oceli – c), d) [2]
- Obr. 4: Vliv úhlu natočení na síta a obrazce [2]
- Obr. 5: Ukázka ručního zařízení pro sítotisk [7]
- Obr. 6: Princip šablonového tisku [5]
- Obr. 7: Metoda nanášení pomocí jehly – Writing [1]
- Obr. 8: Princip nanášení pomocí metody jetting [1]
- Obr. 9: Časový průběh teploty při výpalu/vytvrzování vytvořené vrstvy [2]
- Obr. 10: Způsob přípravy vrstev, z pevného terčíku u PVD metod a z plynu u CVD [9]
- Obr. 11: Zjednodušené schéma komory aparatury pro vakuové napařování [8]
- Obr. 12: Zjednodušené schéma komory pro technologii katodového napařování [10]
- Obr. 13 Řez tenkými vrstvami vytvořenými pomocí CVD a PVD metod [9]
- Obr. 14 Struktura vodivých vrstev vpalovaných při a) nižší b) vyšší teplotě a za použití různých tavivových složek [2]
- Obr. 15 Použitá horkovzdušná pec
- Obr. 16 Vzory v použitém sítu
- Obr. 17 Vzorky z pasty CSP-3110D vlevo a z pasty CSP-3225 vpravo
- Obr. 18 Vzorky z pasty Paron-910 Series vlevo a z pasty Paron-920 vpravo
- Obr. 19 Digitální multimetr použitý na měření elektrického odporu
- Obr. 20 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 1 (CSP-3110D)
- Obr. 21 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 2 (CSP-3110D)
- Obr. 22 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 3 (CSP-3110D)
- Obr. 23 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 1 (CSP-3225)
- Obr. 24 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 2 (CSP-3225)
- Obr. 25 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 3 (CSP-3225)
- Obr. 26 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 1 (Paron-910 Series)
- Obr. 27 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 2 (Paron-910 Series)
- Obr. 28 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 3 (Paron-910 Series)
- Obr. 29 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 1 (Paron-920)
- Obr. 30 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 2 (Paron-920)
- Obr. 31 Graf závislosti elektrického odporu na teplotě při vytvrzování pro motiv 3 (Paron-920)
- Obr. 32 Mikroskop s kamerou
- Obr. 33 Měření šířky 1
- Obr. 34 Měření šířky 2

- Obr. 35 Povrch vodiče z pasty CSP-3110D (Ag stará) vlevo a z pasty Paron-910 Series (Ag nová) vpravo
- Obr. 36 Povrch vodiče z pasty CSP-3225 (C stará) vlevo a z pasty Paron-920 (C nová) vpravo
- Obr. 37 Prasklina v keramické podložce
- Obr. 38 Rozmáznutí vrstvy posunem podložky/síta
- Obr. 39 Nežádoucí předmět ve vrstvě
- Obr. 40 Rozmáznutí/rozpítí vrstvy špatným přisednutím síta na podložku
- Obr. 41 Nedostatek pasty při vytváření vrstvy
- Obr. 42 Nedokončený vodič
- Obr. 43 Ucpání ok síta
- Obr. 44 Příklad na měření tloušťky vrstev
- Obr. 45 Vliv otřesů na měření
- Obr. 46 Porovnání vzorků ze stříbrných past



## Seznam použitých zdrojů

- [1] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [2] SOUTOR, Zdeněk, Josef ŠAVEL a Jaroslav ŽŮREK. *Hybridní integrované obvody*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982.
- [3] GUPTA, Tapan. *Handbook of thick- and thin-film hybrid microelectronics*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2003. ISBN 9780471272298.
- [4] *Tenké vrstvy* [online]. 2010 [cit. 2013-10-11]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf)
- [5] SZENDIUCH, Ivan. *2012-02A-tlusté vrstvy(Bc)* [online]. 2012-2013 [cit. 29. 4. 2019]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9%20vrstvy\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9%20vrstvy(Bc).pdf)
- [6] MACH, Pavel. *Tlusté vrstvy a tlustovrstvé technologie* [online]. [cit. 24. 4. 2019]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34508/mod\\_resource/content/1/Tluste\\_vrstvy\\_a\\_tlustovrstve\\_technologie.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34508/mod_resource/content/1/Tluste_vrstvy_a_tlustovrstve_technologie.pdf)
- [7] UNIPRINT. *pbt works* [online]. [cit. 24. 4. 2019]. Dostupný na WWW: <https://www.pbt.cz/cz/produkty/sitotisk-a-dispendovani/sitotisky/uniprint>
- [8] MACH, Pavel. *Tenké vrstvy* [online]. [cit. 25. 4. 2019]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76882/mod\\_resource/content/1/Tenke\\_vrstvy.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76882/mod_resource/content/1/Tenke_vrstvy.pdf)
- [9] *Tenké vrstvy* [online]. 2010 [cit. 25. 4. 2019]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf)
- [10] MACH, Pavel. *Naprašování* [online] [cit. 25. 4. 2019]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34506/mod\\_resource/content/1/Naprasovani.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34506/mod_resource/content/1/Naprasovani.pdf)

## Přílohy

<b>Sada A (150°C/30 minut)</b>											
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,410	1,474	1,416	1,645	1,487	2,150	1,580	1,467	1,480	1,604	1,411
3_4	2,064	2,107	2,094	2,126	2,219	2,666	2,188	2,019	2,168	2,518	2,057
5_6	2,547	2,602	2,600	2,602	2,811	2,969	2,882	2,571	2,771	2,614	2,537
7_8	4,856	5,900	5,042	5,644	5,812	4,706	6,748	4,314	4,541	4,713	5,068
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_10	3,686	3,118	3,388	3,242	3,004	3,183	-	-	-	-	3,110
2_9	3,630	2,630	2,597	3,162	2,818	2,878	2,455	2,566	2,446	2,551	2,613
3_8	2,116	1,769	1,670	2,264	1,994	2,098	1,802	1,936	1,803	1,870	1,772
4_7	1,316	1,238	1,183	1,646	1,300	1,360	1,156	1,264	1,115	1,209	1,119
5_6	0,714	0,684	0,641	0,955	0,710	0,700	0,593	0,662	0,644	0,638	0,534
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	0,733	0,885	0,683	0,772	0,748	-	-	-	-	-	0,604
5_6	1,818	1,889	1,898	1,973	1,839	-	-	-	-	-	1,723
7_8	2,996	3,111	3,240	3,341	3,108	-	-	-	-	-	2,999
9_10	4,278	4,345	4,381	4,326	4,369	4,237	-	-	-	-	4,163

Tabulka č. 16 Naměřené hodnoty elektrického odporu [ $\Omega$ ] z pasty CSP-3110D při vytvrzení 150 °C/30 minut

<b>Sada B (130°C/60 minut)</b>											
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,765	1,895	1,720	1,764	1,652	1,884	1,683	1,652	-	-	1,592
3_4	2,617	2,392	2,715	2,854	2,335	2,617	2,623	-	-	-	2,433
5_6	3,369	3,135	3,528	3,688	3,113	3,439	3,157	3,735	3,216	-	3,216
7_8	5,598	5,431	5,287	5,696	5,339	-	-	-	-	-	5,310
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_10	4,055	3,765	4,671	3,196	3,472	4,329	3,740	-	-	-	3,730
2_9	3,272	3,838	4,021	3,016	2,666	2,814	2,683	2,975	2,925	-	2,974
3_8	2,164	2,601	2,592	2,158	2,182	1,887	1,933	2,026	-	-	2,033
4_7	1,471	1,790	1,755	1,375	1,356	1,436	1,173	1,370	1,422	-	1,301
5_6	0,927	0,969	0,904	0,928	0,677	0,749	0,756	-	-	-	0,684
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,044	0,965	1,128	1,214	0,981	0,790	0,822	0,928	-	-	0,824
5_6	2,311	2,001	2,498	2,339	2,332	2,465	2,533	2,635	-	-	2,229
7_8	3,735	4,047	3,222	2,376	3,584	4,036	4,206	3,951	3,894	-	3,512
9_10	4,407	4,626	4,524	4,624	4,725	4,821	4,635	-	-	-	4,463

Tabulka č. 17 Naměřené hodnoty elektrického odporu [ $\Omega$ ] z pasty CSP-3110D při vytvrzení 130 °C/60 minut

<b>Sada C (170°C/30 minut)</b>											
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,297	1,200	1,338	1,534	1,386	1,533	1,496	1,546	1,305	1,409	1,244
3_4	1,904	1,822	2,460	2,228	2,014	1,938	2,032	1,898	1,757	1,848	1,830
5_6	2,300	2,282	2,321	2,466	2,407	2,650	2,885	2,395	2,560	-	2,314
7_8	4,414	4,397	4,310	4,255	4,057	-	-	-	-	-	4,127
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_10	3,078	2,927	2,938	3,014	2,777	3,071	-	-	-	-	2,808
2_9	2,293	2,291	2,284	2,870	2,234	2,804	-	-	-	-	2,303
3_8	2,305	2,322	1,639	1,647	1,707	1,668	1,620	-	-	-	1,684
4_7	1,196	1,208	1,361	1,215	1,381	1,646	1,036	1,360	1,123	1,038	1,096
5_6	0,578	0,568	0,595	0,550	0,661	0,739	0,697	0,714	0,666	0,645	0,481
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	0,683	0,770	0,725	0,761	-	-	-	-	-	-	0,575
5_6	1,690	1,801	1,747	-	-	-	-	-	-	-	1,586
7_8	2,807	2,958	2,799	-	-	-	-	-	-	-	2,695
9_10	3,411	3,411	3,325	3,581	-	-	-	-	-	-	3,272

Tabulka č. 18 Naměřené hodnoty elektrického odporu [Ω] z pasty CSP-3110D při vytvrzení 170 °C/30 minut

<b>Sada D (220°C/20 minut)</b>				
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,107	1,205	1,235	1,022
3_4	1,627	1,761	1,700	1,536
5_6	1,986	2,230	2,148	1,961
7_8	3,871	3,756	-	3,654
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Průměr</b>
1_10	2,390	2,766	-	2,418
2_9	1,891	2,134	2,001	1,849
3_8	1,522	1,577	1,439	1,353
4_7	0,980	0,946	1,026	0,824
5_6	0,600	0,549	0,586	0,418
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Průměr</b>
1_2	0,744	0,643	-	0,534
5_6	1,465	1,634	-	1,390
7_8	2,333	2,777	2,593	2,408
9_10	3,075	3,864	3,964	3,474

Tabulka č. 19 Naměřené hodnoty elektrického odporu [Ω] z pasty CSP-3110D při vytvrzení 220 °C/20 minut

<b>Sada A (130°C/30 minut)</b>											
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	3,341	4,341	3,018	3,617	3,063	3,874	2,905	3,181	2,248	2,675	3,066
3_4	3,953	4,698	3,853	4,854	3,441	4,459	4,309	3,692	4,403	3,860	3,992
5_6	5,059	6,647	4,863	5,822	4,249	5,693	6,672	5,014	5,853	5,087	5,336
7_8	10,08	13,91	8,398	9,548	8,021	11,08	9,523	8,381	8,402	10,900	9,664
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_10	9,071	7,102	8,128	7,304	10,08	10,27	10,12	10,06	9,760	7,770	8,806
2_9	5,723	5,442	5,940	6,646	5,725	6,883	5,957	6,687	8,330	5,981	6,171
3_8	5,721	3,710	3,645	3,894	3,564	3,769	4,183	5,771	4,624	4,032	4,131
4_7	2,629	2,441	2,312	2,375	2,265	2,501	2,792	2,704	3,004	2,331	2,375
5_6	1,276	1,245	1,084	1,061	1,050	1,271	1,289	1,172	1,654	1,723	1,123
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,215	1,062	1,309	1,021	1,141	1,144	1,783	1,864	1,463	1,687	1,209
5_6	4,347	4,082	4,265	3,870	3,861	4,132	4,744	4,612	4,556	4,414	4,128
7_8	7,163	6,454	6,803	6,334	6,633	6,470	7,224	7,948	7,556	8,241	6,923
9_10	9,135	10,88	9,890	8,884	8,581	7,136	7,664	8,779	9,283	8,894	8,753

Tabulka č. 20 Naměřené hodnoty elektrického odporu [kΩ] z pasty CSP-3225 při vytvrzení 130 °C/30 minut

<b>Sada B (150°C/20 minut)</b>											
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	2,170	2,113	1,804	2,020	1,673	2,149	1,782	1,636	1,878	1,905	1,753
3_4	3,341	2,597	3,350	2,407	2,921	3,576	2,641	2,783	2,897	2,762	2,768
5_6	5,204	5,920	3,129	3,371	2,925	3,380	3,682	3,703	3,404	3,895	3,701
7_8	6,352	6,013	7,359	5,206	6,411	6,886	7,732	6,307	6,856	6,480	6,400
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_10	8,112	5,947	8,383	5,238	5,437	-	-	-	-	-	6,413
2_9	6,000	4,061	3,754	3,519	3,648	3,773	4,774	4,360	3,732	4,470	3,999
3_8	2,589	2,373	2,942	2,602	2,914	2,924	3,229	2,957	2,423	2,270	2,512
4_7	2,414	2,041	1,632	1,625	1,607	1,737	1,838	1,620	1,713	1,554	1,568
5_6	0,985	1,132	0,947	0,821	0,813	0,970	0,897	0,781	0,766	0,806	0,682
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	0,923	1,201	0,915	0,923	0,971	0,932	0,878	0,948	0,823	-	0,736
5_6	2,850	2,823	2,724	2,873	2,812	3,165	3,638	3,627	2,964	2,745	2,812
7_8	5,145	4,471	4,550	4,406	4,548	4,608	5,411	5,109	4,520	5,337	4,601
9_10	5,847	6,389	5,148	5,318	5,110	5,198	6,417	5,804	-	-	5,444

Tabulka č. 21 Naměřené hodnoty elektrického odporu [kΩ] z pasty CSP-3225 při vytvrzení 150 °C/20 minut

<b>Sada C (110°C/50 minut)</b>											
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,730	2,562	2,824	2,609	2,601	2,504	2,848	2,839	2,465	3,227	2,411
3_4	4,112	3,930	4,467	3,858	4,457	3,813	3,593	4,123	4,457	3,62	3,833
5_6	5,881	5,344	6,104	5,131	5,843	5,338	5,819	6,523	5,467	5,789	5,514
7_8	10,01	10,05	10	10,420	9,154	10,12	10,42	9,678	8,971	10,05	9,677
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_10	6,954	7,052	8,904	8,915	8,174	8,475	7,406	8,709	8,180	-	7,875
2_9	4,843	4,679	5,802	5,284	4,783	5,370	5,537	6,491	5,326	-	5,136
3_8	3,842	3,452	4,249	3,753	3,494	3,672	4,033	4,429	3,874	3,617	3,632
4_7	2,509	2,241	2,615	2,407	2,343	2,423	2,722	2,579	2,700	2,371	2,281
5_6	1,335	1,354	1,224	1,423	1,287	1,434	1,297	1,269	1,342	1,171	1,104
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,454	1,415	1,517	1,892	1,384	1,655	1,253	1,480	-	-	1,296
5_6	5,379	5,334	4,783	4,860	4,354	4,362	4,545	4,727	4,543	4,612	4,540
7_8	8,407	8,487	7,682	8,719	6,675	7,861	7,157	7,823	7,550	7,646	7,591
9_10	10,03	8,704	8,638	8,329	8,524	8,725	7,824	7,966	-	-	8,383

Tabulka č. 22 Naměřené hodnoty elektrického odporu [kΩ] z pasty CSP-3225 při vytvrzení 110 °C/50 minut

<b>Sada D (200°C/40 minut)</b>					
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,240	1,414	1,463	-	1,162
3_4	1,839	2,262	-	-	1,841
5_6	2,299	2,871	2,564	-	2,368
7_8	4,122	5,213	4,943	-	4,549
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>Průměr</b>
1_10	-	-	-	-	-
2_9	3,834	3,082	2,886	2,89	2,963
3_8	2,124	1,935	2,057	2,059	1,834
4_7	1,451	1,312	1,365	1,334	1,156
5_6	0,685	0,702	0,707	0,694	0,487
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>Průměr</b>
1_2	0,733	0,602	0,779	-	0,495
5_6	2,246	1,875	2,924	-	2,138
7_8	3,458	3,280	4,003	-	3,370
9_10	4,231	3,856	4,826	-	4,094

Tabulka č. 23 Naměřené hodnoty elektrického odporu [kΩ] z pasty CSP-3225 při vytvrzení 200 °C/40 minut

<b>Sada A (130°C/30 minut)</b>											
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	2,263	2,204	2,226	2,147	2,305	2,250	2,145	2,117	2,379	2,087	1,689
3_4	2,805	2,973	2,891	2,834	2,864	2,746	2,901	2,724	3,038	2,972	2,352
5_6	3,664	3,573	3,526	3,451	3,676	3,442	3,722	3,346	3,590	3,620	3,038
7_8	5,589	5,514	5,352	5,463	5,917	5,276	5,289	5,902	5,623	5,248	4,994
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_10	4,462	4,503	4,713	5,129	4,800	4,356	4,572	4,179	4,912	4,567	4,096
2_9	3,705	3,672	3,562	3,735	3,831	3,572	3,549	3,847	3,566	3,548	3,136
3_8	2,821	2,706	2,753	2,860	2,917	2,758	2,693	3,021	2,760	2,659	2,272
4_7	2,038	2,057	2,012	2,069	2,163	2,065	2,024	2,205	2,023	1,983	1,541
5_6	1,265	1,367	1,285	1,283	1,254	1,302	1,220	1,421	1,184	1,208	0,756
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,038	1,170	1,335	1,206	1,257	1,183	1,305	1,249	1,204	1,277	0,699
5_6	2,724	2,835	2,911	3,164	2,894	3,306	2,887	3,002	2,680	2,764	2,394
7_8	4,490	4,492	4,685	4,953	4,560	4,126	5,072	4,531	4,472	4,809	4,096
9_10	4,698	4,837	5,025	5,064	5,460	5,761	5,112	6,084	5,304	6,180	4,830

Tabulka č. 24 Naměřené hodnoty elektrického odporu [Ω] z pasty Paron-910 Series při vytvrzení 130 °C/30 minut

<b>Sada B (130°C/60 minut)</b>											
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	2,544	2,375	2,067	2,019	2,021	2,315	2,114	1,982	2,307	2,010	1,652
3_4	2,982	2,807	2,579	2,648	2,812	2,733	2,976	2,854	2,963	2,781	2,291
5_6	3,305	3,460	3,332	3,904	3,564	3,290	2,571	3,284	3,554	3,820	2,885
7_8	5,724	5,701	5,488	5,562	5,379	5,778	5,876	5,482	5,545	3,825	4,913
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_10	5,614	5,503	4,506	4,840	5,069	5,132	4,555	5,176	5,149	5,135	4,545
2_9	3,972	3,735	3,804	3,489	3,775	3,860	3,701	3,904	3,610	3,508	3,213
3_8	2,788	2,891	2,695	2,684	3,041	2,789	2,804	3,025	2,627	2,706	2,282
4_7	2,080	2,205	2,064	2,009	2,175	2,236	2,024	2,107	2,163	1,960	1,579
5_6	1,375	1,324	1,322	1,307	1,342	1,576	1,255	1,310	1,425	1,317	0,832
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,323	1,331	1,239	1,346	1,357	1,403	1,517	1,219	1,192	1,315	0,801
5_6	3,170	3,192	3,117	3,048	2,957	3,359	2,816	2,846	2,711	2,852	2,484
7_8	5,284	5,062	4,759	5,587	5,183	5,522	5,370	5,734	4,730	4,672	4,667
9_10	5,430	5,735	5,304	5,207	5,580	5,854	4,929	5,537	6,286	-	5,017

Tabulka č. 25 Naměřené hodnoty elektrického odporu [Ω] z pasty Paron-910 Series při vytvrzení 130 °C/60 minut

<b>Sada C (150°C/25 minut)</b>											
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	2,119	1,963	2,157	1,926	2,250	2,024	1,876	2,093	1,997	2,025	1,520
3_4	2,711	2,943	2,763	2,928	2,573	3,010	2,630	2,557	2,690	2,710	2,229
5_6	3,393	3,212	3,370	3,333	3,655	3,419	3,103	3,694	3,640	3,285	2,887
7_8	5,072	5,290	5,250	5,733	5,476	5,271	5,124	5,611	5,354	5,681	4,863
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_10	4,797	4,849	4,945	5,110	4,608	5,811	4,831	5,438	5,476	4,968	4,560
2_9	3,620	3,746	3,535	3,523	3,594	3,320	3,880	3,581	3,632	3,775	3,098
3_8	2,676	2,829	2,671	2,955	2,525	2,915	2,689	2,480	2,644	2,826	2,198
4_7	1,750	2,023	1,964	1,914	1,763	1,920	1,989	1,929	1,944	2,100	1,407
5_6	1,326	1,344	1,269	1,416	1,326	1,376	1,149	1,279	1,250	1,201	0,771
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,295	1,359	1,266	1,331	1,161	1,345	1,200	1,450	1,445	1,359	0,798
5_6	3,032	3,238	2,918	3,128	2,921	2,659	2,646	2,720	3,092	3,058	2,418
7_8	5,059	4,600	4,597	5,006	4,314	4,657	4,549	5,060	5,151	4,632	4,240
9_10	5,393	5,432	4,842	5,082	4,798	5,060	5,356	4,766	4,901	4,835	4,524

Tabulka č. 26 Naměřené hodnoty elektrického odporu [Ω] z pasty Paron-910 Series při vytvrzení 150 °C/25 minut

<b>Sada D (100°C/30 minut)</b>				
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Průměr</b>
1_2	2,215	2,082	1,906	1,545
3_4	3,074	3,025	2,877	2,469
5_6	3,638	3,605	3,575	3,083
7_8	5,552	5,719	5,650	5,117
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Průměr</b>
1_10	5,902	5,878	5,214	5,142
2_9	3,766	3,770	3,666	3,211
3_8	2,979	2,843	2,979	2,411
4_7	2,165	2,170	2,131	1,632
5_6	1,408	1,362	1,385	0,862
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,494	1,426	1,476	0,942
5_6	3,280	3,265	2,946	2,641
7_8	5,169	5,230	4,936	4,589
9_10	5,440	5,370	5,391	4,877

Tabulka č. 27 Naměřené hodnoty elektrického odporu [Ω] z pasty Paron-910 Series při vytvrzení 100 °C/30 minut



<b>Sada A (130°C/30 minut)</b>											
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,950	1,955	2,218	1,835	2,223	1,960	2,337	2,075	2,656	1,972	2,116
3_4	2,535	2,724	2,994	2,398	2,816	2,319	3,793	3,070	3,353	2,859	2,884
5_6	4,805	3,942	3,857	3,831	4,625	3,757	3,094	3,463	3,802	3,706	3,886
7_8	5,401	6,001	6,821	5,003	7,075	5,244	9,006	6,866	6,601	6,341	6,434
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_10	6,030	5,442	5,801	6,868	6,177	5,238	5,396	6,213	5,822	6,033	5,900
2_9	4,315	3,910	3,822	3,913	4,138	3,355	4,459	3,668	4,350	4,178	4,009
3_8	3,049	2,688	2,636	2,380	2,672	2,429	3,286	2,680	3,381	2,458	2,764
4_7	2,385	1,766	1,864	1,748	1,852	1,784	2,057	2,063	2,104	1,969	1,957
5_6	0,990	0,830	0,962	0,787	0,922	0,924	0,972	1,172	0,970	0,965	0,947
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	0,940	0,742	1,153	0,913	1,013	1,099	1,041	0,878	0,830	0,808	0,940
5_6	2,973	3,873	2,549	3,251	3,097	3,122	2,942	2,861	2,559	2,265	2,947
7_8	6,499	4,995	5,456	5,367	5,554	5,074	5,074	5,042	5,207	5,792	5,404
9_10	7,049	6,529	4,982	5,556	6,455	5,654	5,461	6,703	6,402	7,001	6,177

Tabulka č. 28 Naměřené hodnoty elektrického odporu [kΩ] z pasty Paron-920 při vytvrzení 130 °C/30 minut

<b>Sada B (130°C/60 minut)</b>											
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	2,068	2,322	1,942	1,876	2,625	1,806	2,410	1,855	2,366	1,982	2,123
3_4	2,802	2,324	2,498	2,414	2,497	2,587	3,126	3,045	3,294	2,681	2,725
5_6	3,892	3,428	3,280	3,445	3,261	3,451	3,381	3,326	3,325	4,457	3,523
7_8	7,460	5,869	6,425	6,786	6,598	5,731	5,841	8,145	7,991	5,945	6,677
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_10	6,604	6,104	6,632	5,784	6,780	-	-	-	-	-	6,379
2_9	4,090	3,872	4,466	3,412	3,904	3,360	3,767	3,322	3,849	3,872	3,789
3_8	2,527	2,336	2,848	2,254	2,464	2,184	2,723	2,312	2,525	2,524	2,468
4_7	1,692	1,541	1,894	1,547	1,736	1,532	1,763	1,585	1,794	1,587	1,665
5_6	0,802	0,736	0,854	0,762	0,835	0,723	0,915	0,846	0,888	0,839	0,818
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	0,932	0,741	0,921	0,723	0,916	0,739	0,886	0,992	0,821	-	0,850
5_6	2,396	2,679	2,313	3,103	2,927	3,199	2,232	3,078	2,627	-	2,726
7_8	5,066	4,964	5,317	4,479	5,243	4,565	5,235	4,082	4,206	4,817	4,795
9_10	6,151	5,109	6,200	5,240	6,127	5,166	-	-	-	-	5,664

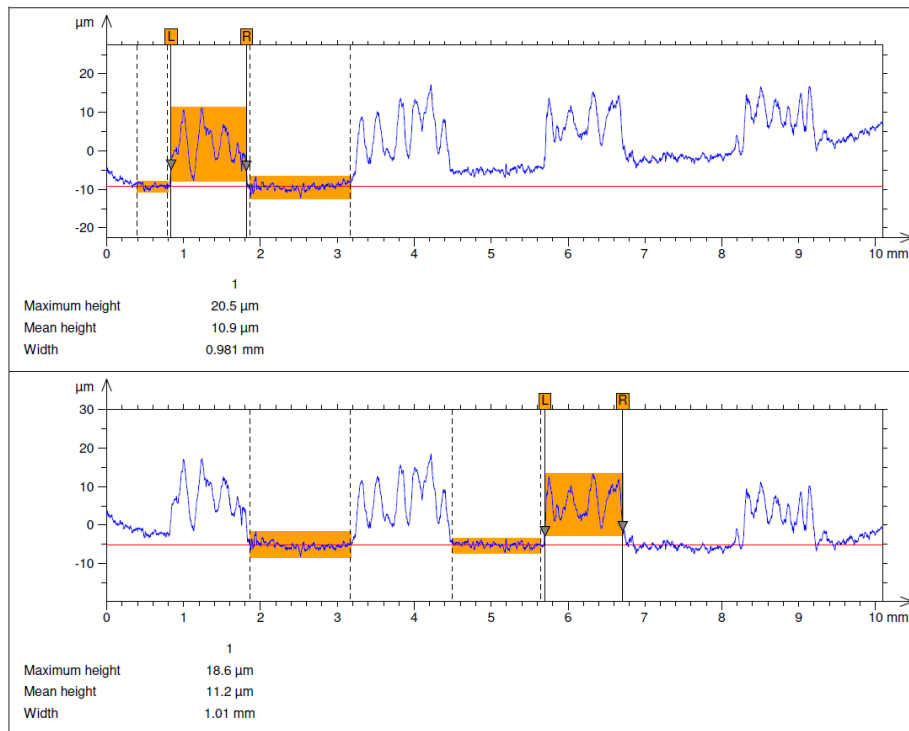
Tabulka č. 29 Naměřené hodnoty elektrického odporu [kΩ] z pasty Paron-920 při vytvrzení 130 °C/60 minut

<b>Sada C (110°C/60 minut)</b>											
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	2,536	2,083	2,779	2,095	2,370	2,938	2,611	3,335	2,227	2,872	2,583
3_4	3,572	4,288	4,869	4,152	4,713	3,493	3,238	3,088	3,043	3,022	3,746
5_6	4,074	4,273	4,260	3,935	3,756	3,740	4,572	5,562	5,500	4,631	4,428
7_8	9,612	8,536	11,633	10,362	9,002	9,079	7,436	7,582	7,633	8,042	8,890
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_10	6,823	6,482	6,983	8,534	8,405	7,142	10,104	6,629	-	-	7,636
2_9	5,514	5,906	5,072	6,314	4,952	6,007	5,170	4,462	5,314	4,632	5,332
3_8	3,309	3,851	3,095	3,143	3,147	3,013	3,869	3,851	3,678	3,832	3,477
4_7	2,428	2,923	2,231	2,951	2,344	2,216	2,342	2,152	2,763	2,124	2,445
5_6	1,126	1,085	1,210	1,058	1,066	1,031	1,381	1,082	1,580	1,120	1,172
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,273	1,066	1,272	1,125	1,209	1,181	1,755	1,124	1,284	1,172	1,244
5_6	4,263	3,917	4,671	3,877	3,822	3,578	4,635	4,135	3,861	4,006	4,075
7_8	7,064	6,863	6,492	8,003	6,250	6,294	8,622	6,530	7,947	7,352	7,140
9_10	6,971	8,204	9,453	6,555	8,959	6,384	7,150	6,793	-	-	7,557

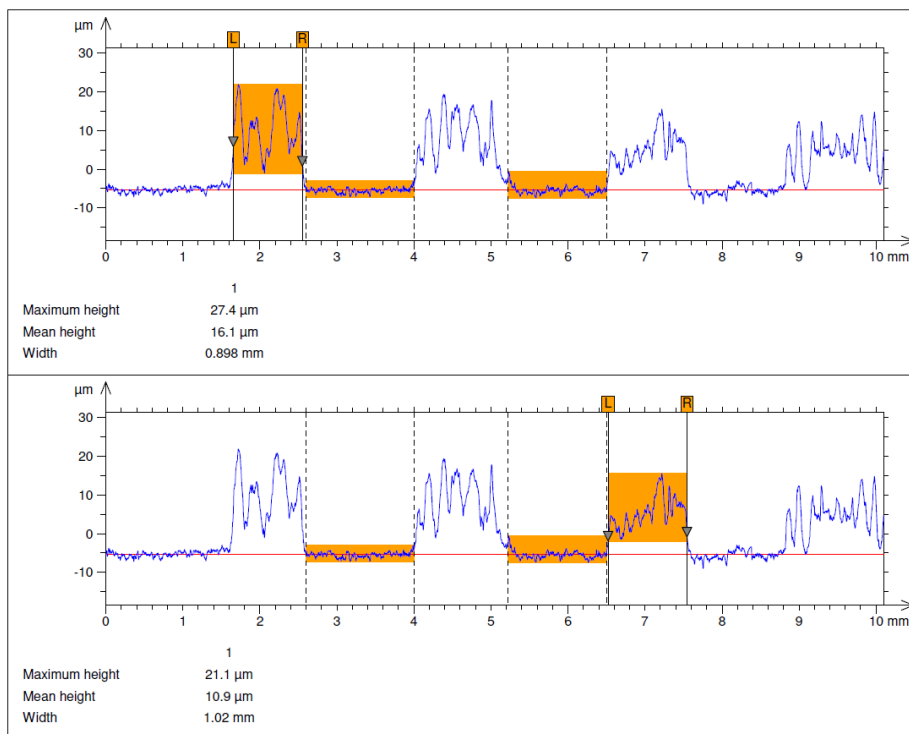
Tabulka č. 30 Naměřené hodnoty elektrického odporu [kΩ] z pasty Paron-920 při vytvrzení 110 °C/60 minut

<b>Sada D (150°C/30 minut)</b>				
<b>Motiv 1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Průměr</b>
1_2	1,392	1,641	1,728	1,585
3_4	2,018	1,896	2,556	2,155
5_6	2,557	2,401	3,603	2,852
7_8	4,588	5,135	6,462	5,393
<b>Motiv 2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Průměr</b>
1_10	4,660	4,871	3,772	4,432
2_9	3,159	3,005	3,035	3,064
3_8	2,265	2,044	2,232	2,178
4_7	1,628	1,404	1,489	1,505
5_6	0,800	0,672	0,745	0,737
<b>Motiv 3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Průměr</b>
1_2	0,861	0,736	0,678	0,756
5_6	1,907	2,446	2,034	2,127
7_8	4,071	3,543	3,829	3,812
9_10	4,116	4,629	4,476	4,405

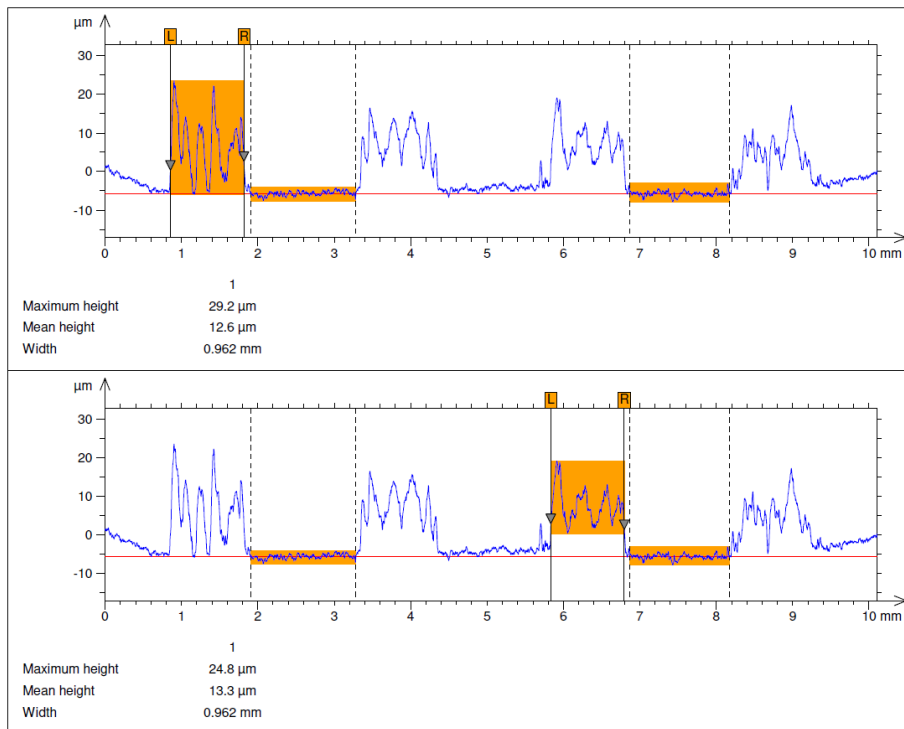
Tabulka č. 31 Naměřené hodnoty elektrického odporu [kΩ] z pasty Paron-920 při vytvrzení 150 °C/30 minut



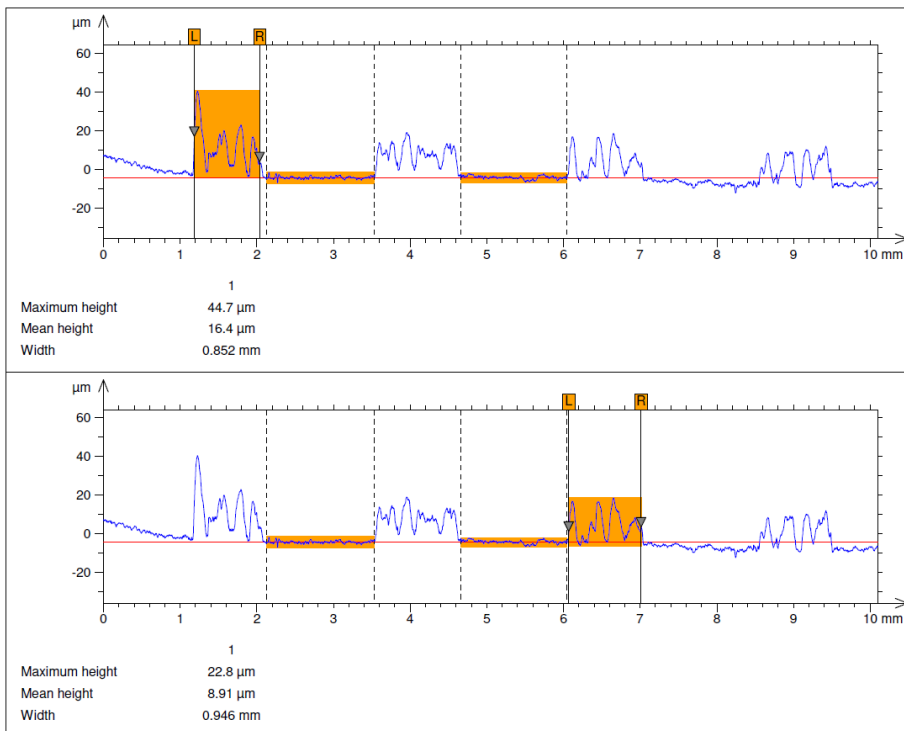
Měření reliéfu vzorků z pasty CPS-3110D při teplotě vytvrzení 150 °C



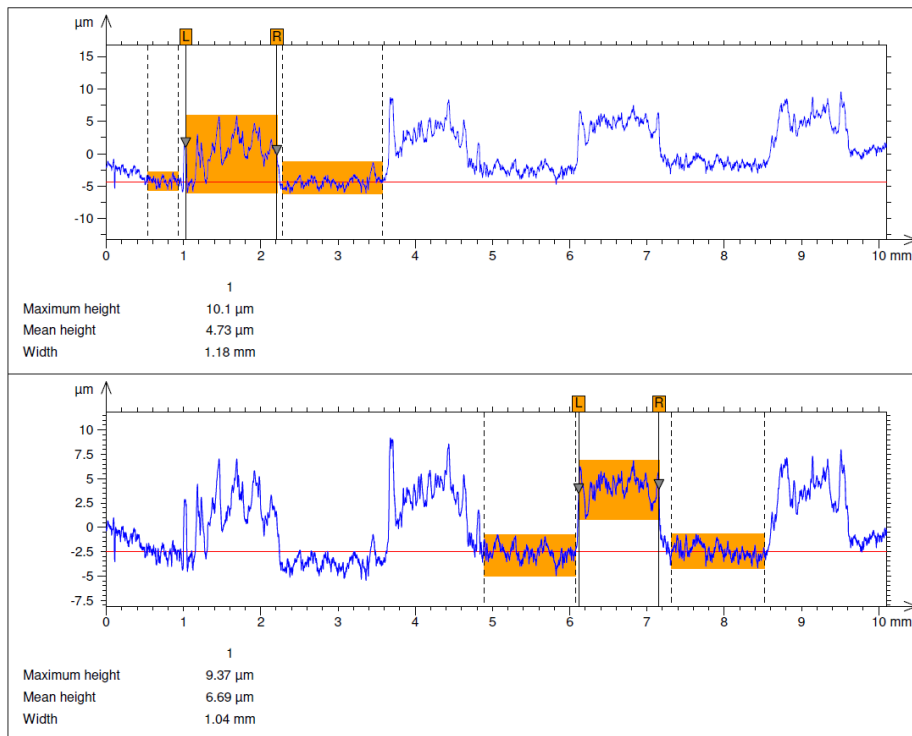
Měření reliéfu vzorků z pasty CPS-3110D při teplotě vytvrzení 130 °C



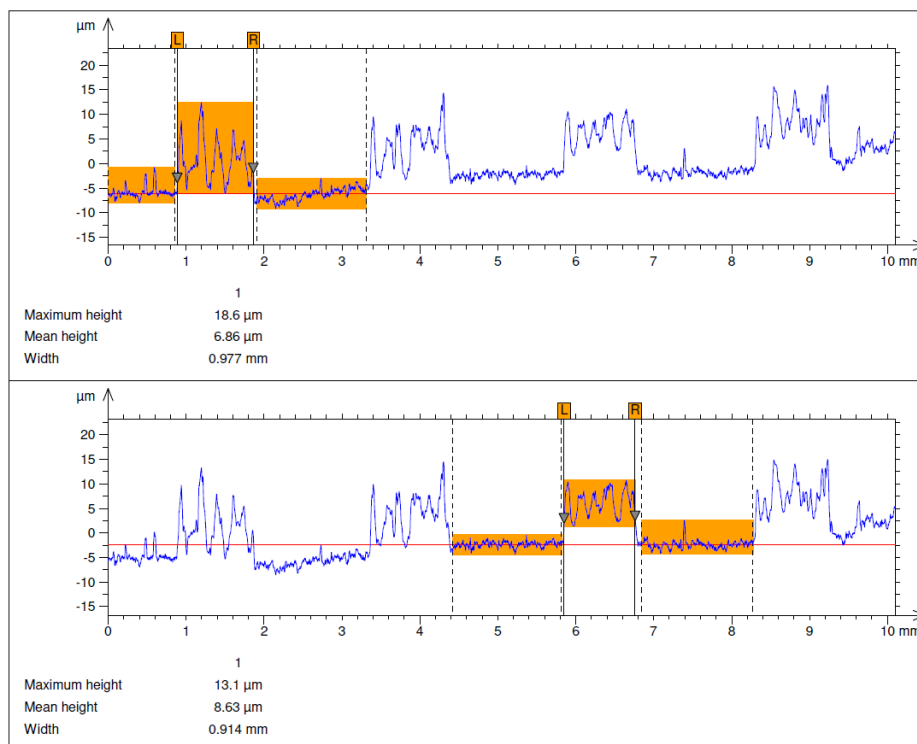
Měření reliéfu vzorků z pasty CPS-3110D při teplotě vytvrzení 170 °C



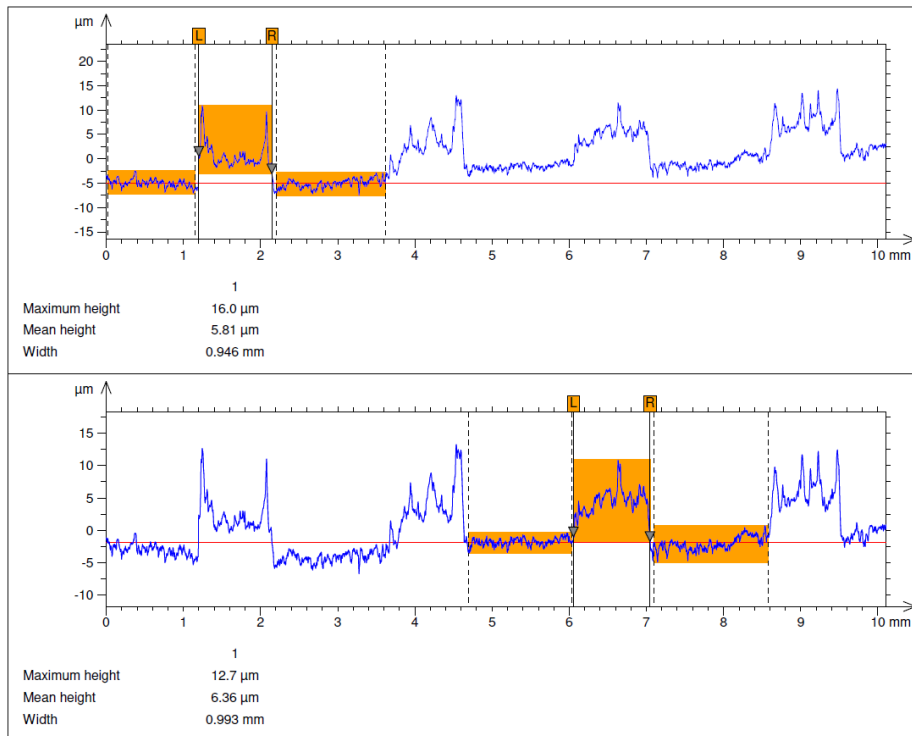
Měření reliéfu vzorků z pasty CPS-3110D při teplotě vytvrzení 220 °C



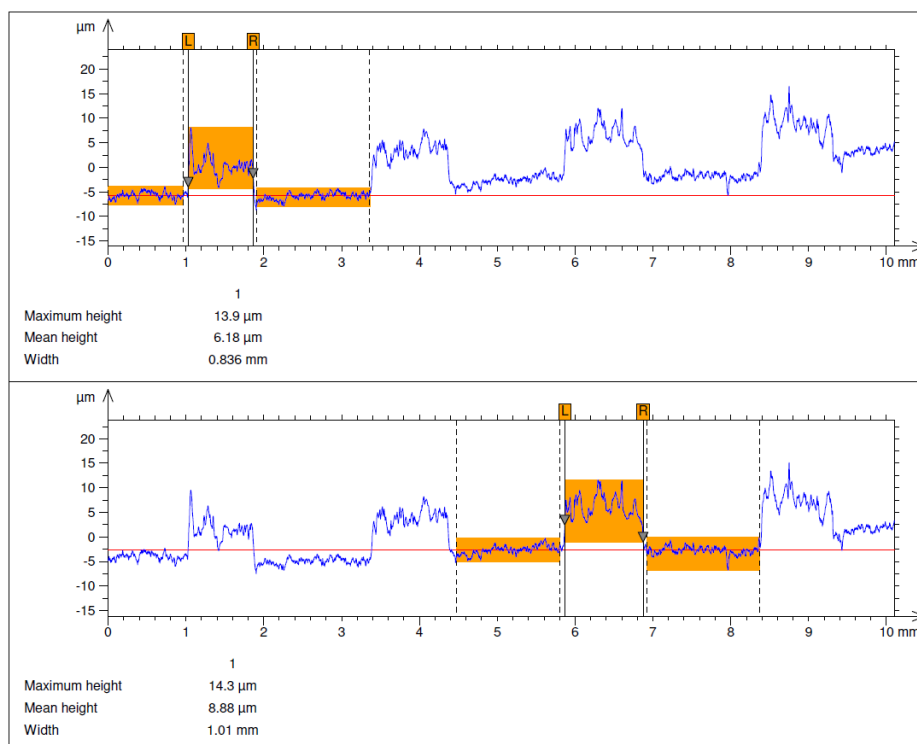
Měření reliéfu vzorků z pasty CPS-3225 při teplotě vytvrzení 130 °C



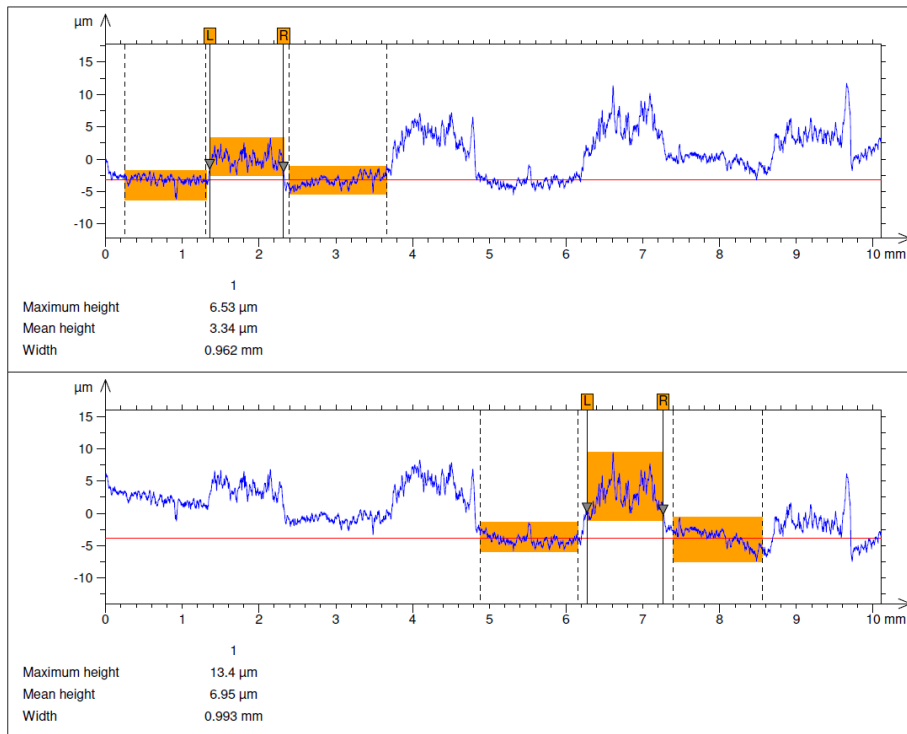
Měření reliéfu vzorků z pasty CPS-3225 při teplotě vytvrzení 150 °C



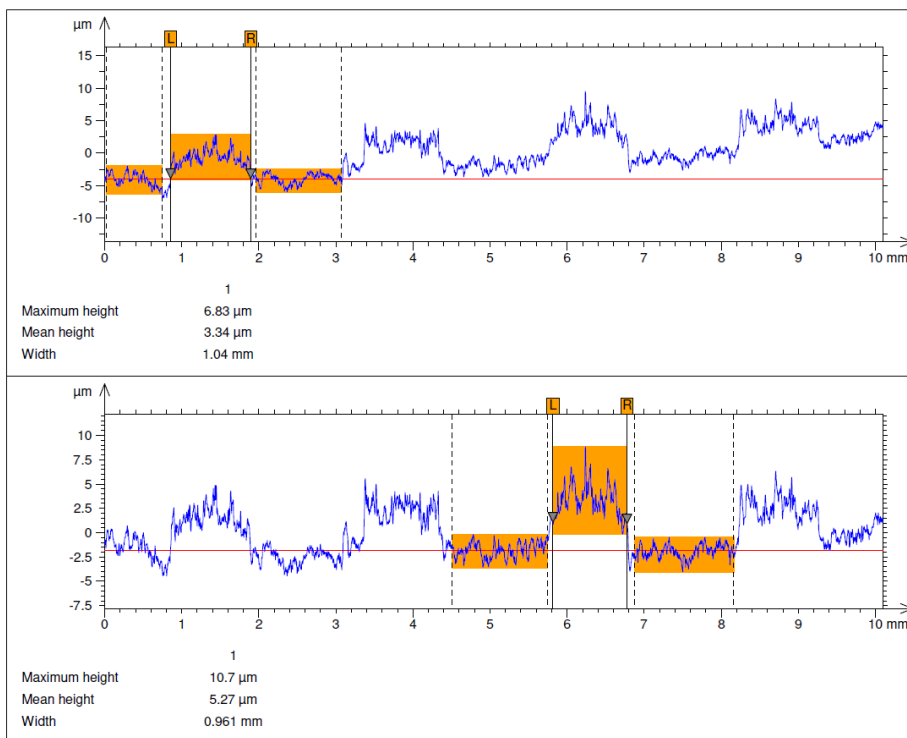
Měření reliéfu vzorků z pasty CPS-3225 při teplotě vytvrzení 110 °C



Měření reliéfu vzorků z pasty CPS-3225 při teplotě vytvrzení 200 °C

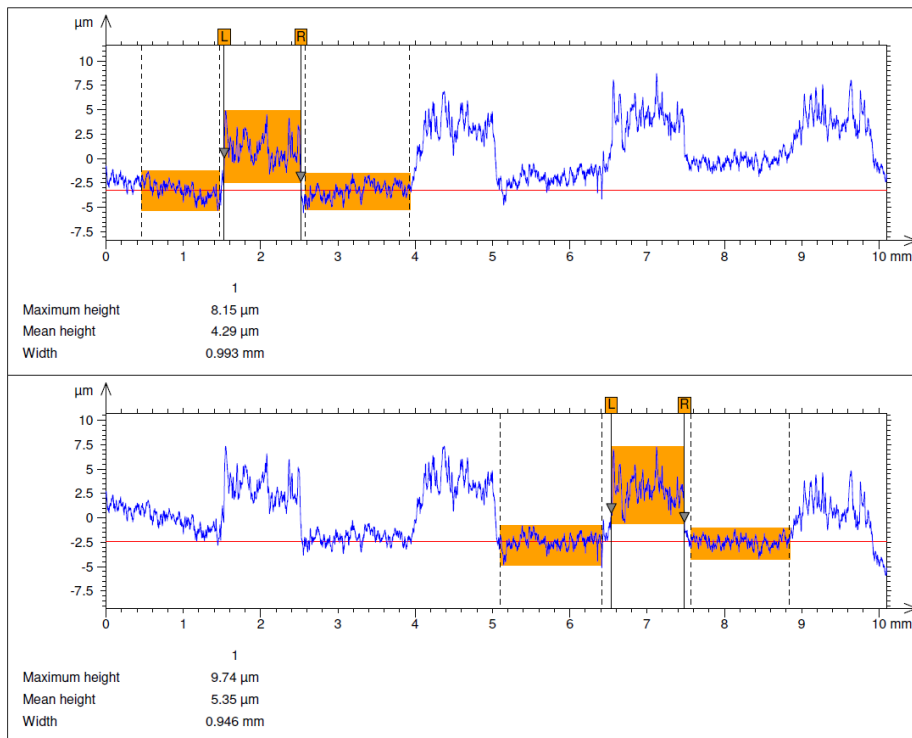


Měření reliéfu vzorků z pasty Paron-910 Series při teplotě vytvrzení 130 °C (1)

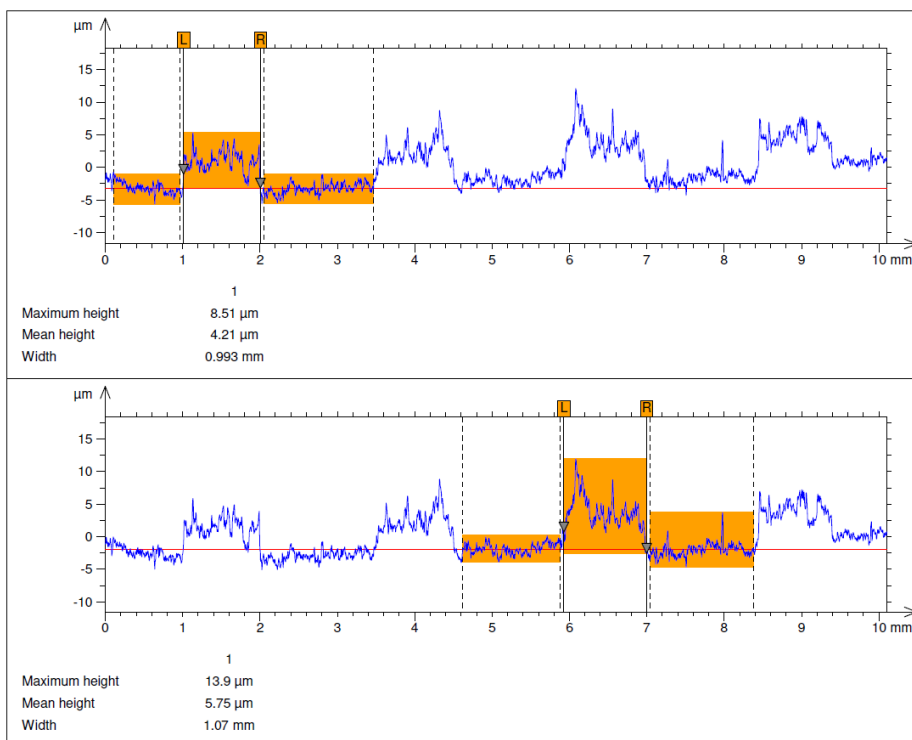


Měření reliéfu vzorků z pasty Paron-910 Series při teplotě vytvrzení 130 °C (2)

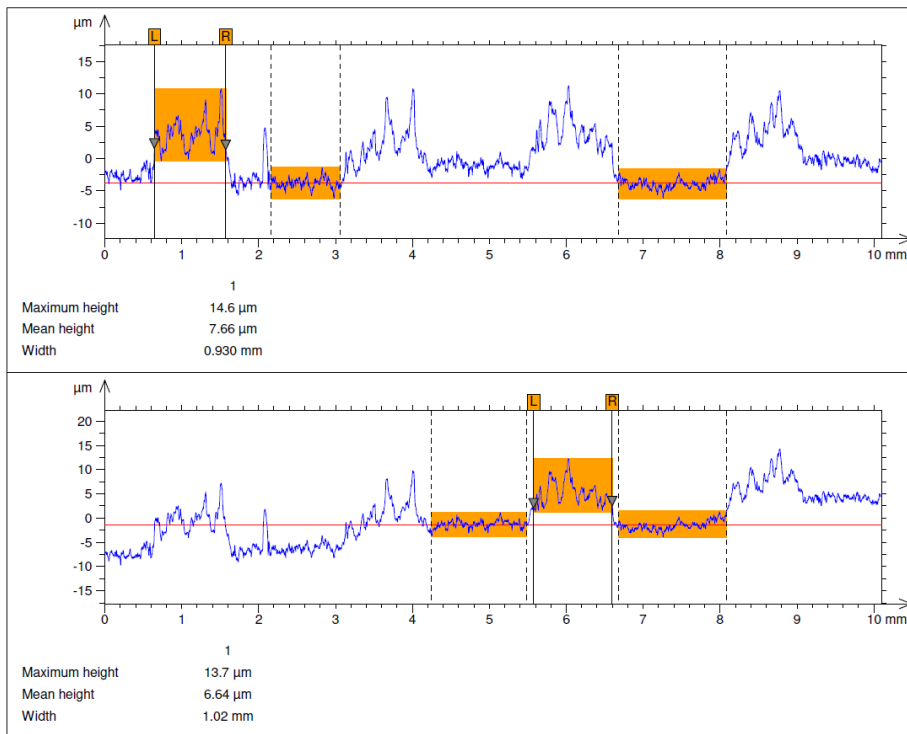




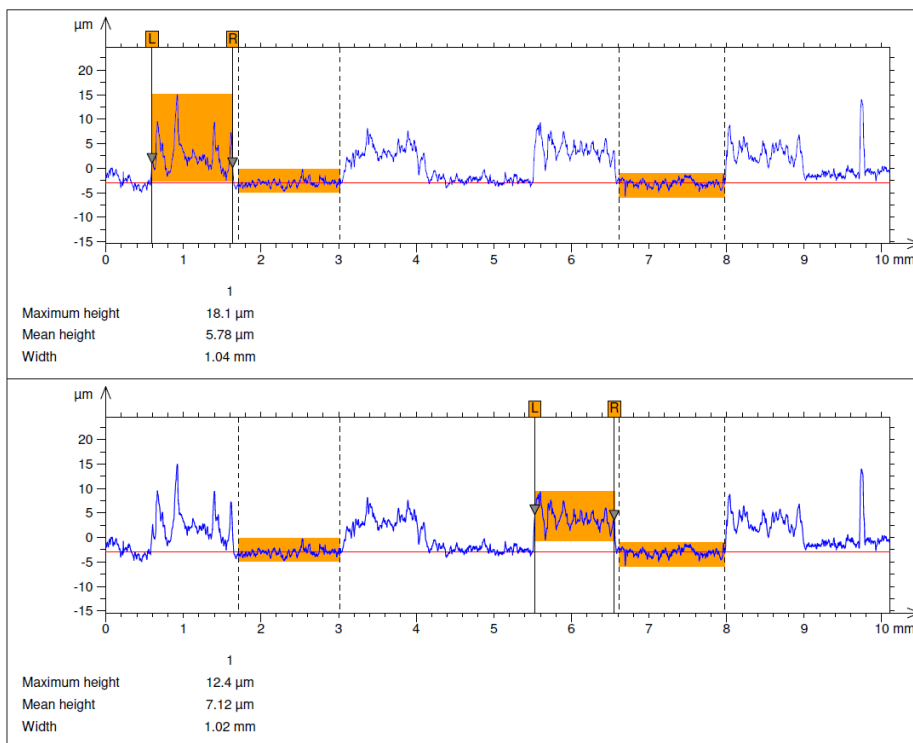
Měření reliéfu vzorků z pasty Paron-910 Series při teplotě vytvrzení 150 °C



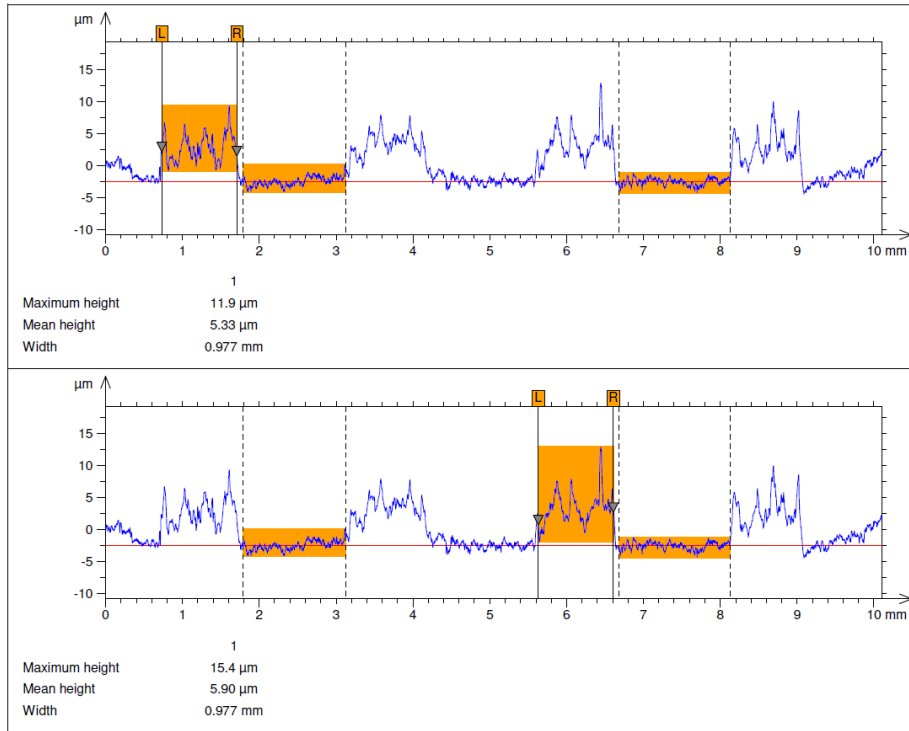
Měření reliéfu vzorků z pasty Paron-910 Series při teplotě vytvrzení 100 °C



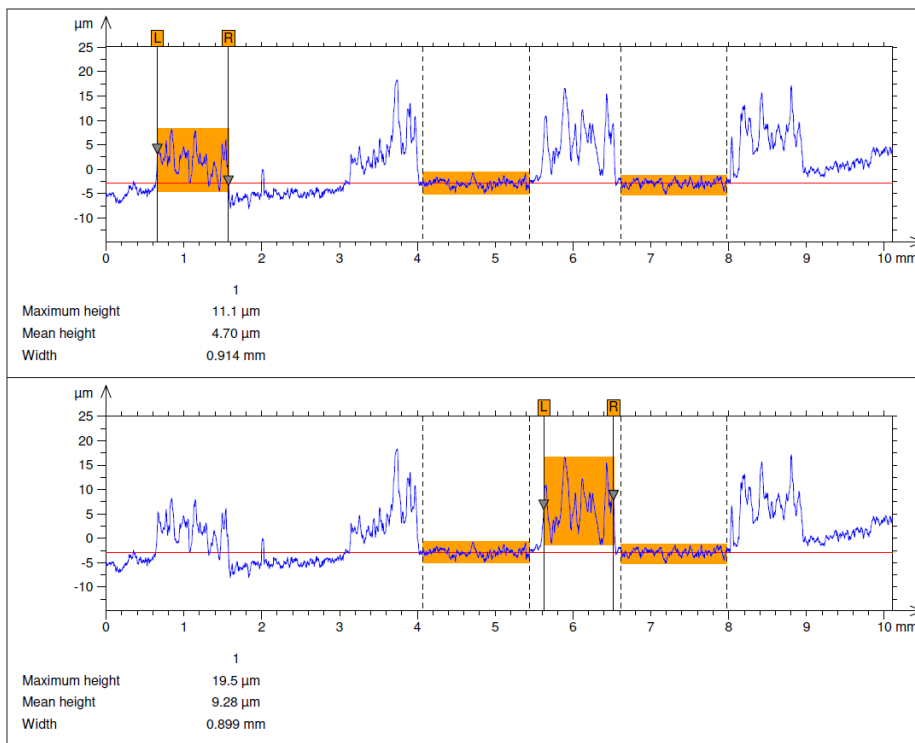
Měření reliéfu vzorků z pasty Paron-920 při teplotě vytvrzení 130 °C (1)



Měření reliéfu vzorků z pasty Paron-920 při teplotě vytvrzení 130 °C (2)



Měření reliéfu vzorků z pasty Paron-920 při teplotě vytvrzení 110 °C



Měření reliéfu vzorků z pasty Paron-920 při teplotě vytvrzení 150 °C