



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

**Tlustovrstvé struktury připravené z polymerních
sítotiskových past**

**Thick Film Structures Prepared from Polymer
Pastes for Screen Printing**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijné obor: Aplikovaná elektrotechnika

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

Pavel Myška

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Myška Jméno: Pavel Osobní číslo: 434901
Fakulta/ústav: Fakulta elektrotechnická
Zadávající katedra/ústav: Katedra elektrotechnologie
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

tlustovrstvé struktury připravené z polymerních síťotiskových past

Název bakalářské práce anglicky:

Thick Film Structures Prepared from Polymer Pastes for Screen Printing

Pokyny pro vypracování:

1. Popište strukturu a vlastnosti tlustých vrstev. Uveďte také přehled technologií používaných pro přípravu tlustých vrstev.
2. Podrobněji se zaměřte na využití tlustovrstvých technologií v moderních aplikacích
3. Připravte vzorky tlustovrstvých struktur z různých polymerních síťotiskových past.
4. Změňte parametry vzorků a výsledky analyzujte

Seznam doporučené literatury:

- [1] MACH, P., SKOČIL, V., URBÁNEK, J.: Montáž v elektronice, ČVUT Praha 2001
- [2] BUJALOBOKOVÁ, M., TRNKA, P.: Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích. Elektro 01/2008
- [3] ZARGAR, R. A., CHACKRABARTI, S., ARORA, M., HAFIZ, A. K.: Synthesis, characterization and interpretation of screen-printed nanocrystalline CdO thick film for optoelectronic applications, International Nano Letters, 06/2016, Ročník 6, Číslo 2

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: 09.02.2017 Termín odevzdání bakalářské práce: 26.05.2017

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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 předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Pavel Myška

Poděkování

Tímto děkuji vedoucí své bakalářské práce Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, připomínky, pomoc při práci v laboratoři často do pozdních večerních hodin a velkou míru trpělivosti.

Anotace

Tato práce se zabývá technologií tlustých vrstev. Rozebírá základní vlastnosti tlustovrstvých struktur, používané materiály, různé způsoby výroby těchto vrstev a jejich využití v dnešních aplikacích. Druhá část práce se věnuje tvorbě tlustovrstvých vzorků z vodivých a odporových past na podložky z korundové keramiky pomocí ručního sítotisku. U vytvořených vzorků je poté zhodnocen vliv rozměrových parametrů včetně tloušťky vrstvy na jejich odpor.

Klíčová slova

tlusté vrstvy, hybridní integrované obvody, sítotisk, odpor na čtverec, sintrovací vazba

Abstract

This thesis deals with thick film technology. It looks into fundamental properties of thick film structures, used materials, methods of manufacture and use of this technology in modern applications. Second part of this thesis is focused on fabrication of thick film samples from conductive and resistive pastes placed on alumina based ceramics by screen printing technology. Relation between sheet resistance and dimension parameters are than discussed on these samples.

Keywords

thick film, hybrid integrated circuit, screen printing, sheet resistance, sintering-bonding

Obsah

Úvod.....	10
1 Tlusté vrstvy.....	11
1.1 Substráty.....	11
1.2 Pasty pro tlusté vrstvy a jejich využití.....	12
1.2.1 Vodivé pasty.....	14
1.2.2 Odporové pasty.....	14
1.2.3 Dielektrické pasty.....	15
1.2.4 Speciální pasty.....	16
1.3 Technologie nanášení tlustých vrstev.....	16
1.3.1 Sítotisk.....	17
1.3.1.1 Zařízení pro sítotisk.....	18
1.3.1.2 Síta.....	19
1.3.1.3 Tvorba vrstvy.....	21
1.3.1.4 Tepelné zpracování.....	21
1.3.2 Šablonový tisk.....	22
1.3.3 Distensing.....	23
1.3.3.1 Writing.....	23
1.3.3.2 Jetting.....	24
1.3.4 Laser structuring.....	24
2 Vlastnosti tlustých vrstev.....	25
2.1 Elektrické vlastnosti.....	26
2.1.1 Odpor na čtverec.....	26
2.2 Tepelné vlastnosti.....	27
2.3 Mechanické vlastnosti.....	28
3 Zhotovení a měření tlustovrstvých vzorků.....	28
3.1 Použité pasty.....	29

3.2	Postup tvorby tlustých vrstev.....	30
3.2.1	Tisk.....	30
3.2.2	Vypálení	32
3.3	Způsob měření připravených vzorků	33
3.3.1	Značení a teoretické rozměry vzorků	33
3.3.2	Měření odporu	34
3.3.3	Měření tloušťky vrstvy	35
3.4	Vyhodnocení výsledků	36
3.4.1	Posouzení vzorků po tisku.....	36
3.4.2	Vzorky z pasty Paron 350.....	39
3.4.3	Vyhodnocení naměřených hodnot.....	42
	Závěr.....	51
	Seznam použitých zdrojů.....	52
	Přílohy	54

Seznam obrázků

Obr. 1:	Struktura vodivé vrstvy	14
Obr. 2:	Struktura SMD rezistoru	15
Obr. 3:	Princip sítotisku	18
Obr. 4:	Ukázka ručního zařízení pro sítotisk	19
Obr. 5:	Struktura síťovin	20
Obr. 6:	Vliv úhlu natočení na síta a obrazce	20
Obr. 7:	Schéma tunelové pece a časový průběh teploty.....	22
Obr. 8:	Dispensing pomocí jehly	24
Obr. 9:	Princip jettingu	24

Obr. 10: Ovrstvení pastou z folie pomocí laseru.....	25
Obr. 11: Rozměry tlusté vrstvy	27
Obr. 12: Motivy síta	30
Obr. 13: Použité síto pro tlustovrstvý tisk	31
Obr. 14: Použitá pec s odporovým ohřevem	32
Obr. 15: Příklad značení destiček.....	33
Obr. 16: Teoretické rozměry použitých motivů	34
Obr. 17: Znázornění směru měření tloušťky vrstvy	35
Obr. 18: Analýza dat získaných měřením na drsnoměru	36
Obr. 19: Neslitá pasta	37
Obr. 20: Vliv odtrhu na strukturu vrstvy	37
Obr. 21: Pasta rozlitá mimo požadovaný vzor	38
Obr. 22: Cesta přerušená vlivem ucpání ok	38
Obr. 23: Vzorek použitý pro prvkovou analýzu	40
Obr. 24: Vrstva vystavená soli v řezu	41

Seznam tabulek

Tab. 1: Typické vlastnosti korundové keramiky.....	12
Tab. 2: Změna po vystavení slané vodě	39
Tab. 3: Prvky obsažené ve vzorku pro prvkovou analýzu	41

Seznam grafů

Graf 1: Porovnání teoretických a naměřených šířek vrstev pro všechny pasty	43
Graf 2: Paron 910 - Závislost naměřeného odporu na délce tlusté vrstvy	43
Graf 3: Paron 910 - Závislost naměřeného odporu na reálné šířce tlusté vrstvy	44
Graf 4: Paron 910 - Závislost naměřeného odporu na tloušťce tlusté vrstvy.....	44

Graf 5: Paron 910 – Závislost odporu na čtverec na délce vrstvy	45
Graf 6: CSP 3110D – Závislost odporu na čtverec na délce vrstvy	45
Graf 7: Paron 920 – Závislost odporu na čtverec na délce vrstvy	46
Graf 8: Paron 350– Závislost odporu na čtverec na délce vrstvy	46
Graf 9: Paron 910– Závislost odporu na čtverec na šířce vrstvy.....	47
Graf 10: CSP 3110D– Závislost odporu na čtverec na šířce vrstvy	47
Graf 11: Paron 920– Závislost odporu na čtverec na šířce vrstvy.....	48
Graf 12: Paron 350– Závislost odporu na čtverec na šířce vrstvy.....	48
Graf 13: Paron 910– Závislost odporu na čtverec na tloušťce vrstvy	49
Graf 14: CSP 3110D– Závislost odporu na čtverec na tloušťce vrstvy.....	49
Graf 15: Paron 920– Závislost odporu na čtverec na tloušťce vrstvy	50
Graf 16: Paron 350– Závislost odporu na čtverec na tloušťce vrstvy_	50

Úvod

Elektronika se dnes stala neodmyslitelnou součástí našich každodenních životů a jsou na ni kladeny neustále větší nároky. Elektronická zařízení musí být menší a přitom výkonnější, spolehlivější a přitom levnější. Aby bylo možné těchto a mnoha dalších protichůdných požadavků dosáhnout, je nezbytné úměrně k požadavkům upravovat i používané technologie výroby. Dobrou úroveň miniaturizace a spolehlivosti při zachování nízkých výrobních nákladů umožňují již hojně využívané technologie tenkých a tlustých vrstev. Tyto technologie i dnes procházejí neustálým vývojem, aby dokázaly uspokojit stále rostoucí požadavky moderního trhu.

Tato práce se zaměřuje pouze na druhou zmíněnou technologii, tj. tlusté vrstvy. Tato technologie prošla od svého prvního použití velkým vývojem, a to jak z hlediska používaných past, tak z hlediska technologií nanášení těchto vrstev. Neznamená to však, že by původní technologie byly zapomenuty a nahrazeny. I v dnešní době se hojně používá původní technologie nanášení sítotiskem, která při použití moderních materiálů a postupů nabízí uspokojivý poměr mezi cenou a kvalitou výsledné vrstvy.

Téma tlustých vrstev je však tak rozsáhlé, že obsáhnout veškeré jeho detaily není v možnostech bakalářské práce. Proto se zaměříme pouze na základní problematiku, jako jsou způsoby nanášení tlustých vrstev, používané pasty a možnosti jejich použití v dnešních aplikacích. Obsahem praktické části bylo vytváření vodivých a odporových tlustovrstvých vzorků na podložky z korundové keramiky za pomoci sítotisku a měření vlastností těchto vrstev. Rozebíranými vlastnostmi jsou odpory jednotlivých past vzhledem k jejich rozměrům, a to jak k délce a šířce těchto vrstev, tak i k jejich naměřené tloušťce.

Speciální pozornost byla věnována vzorkům z pasty Paron 350. Ta byla výrobcem uváděna jako vodivá pasta s velmi nízkou hodnotou odporu na čtverec, avšak první měření ukazovalo hodnoty o několik řádů vyšší. Nakonec se podařilo nekonvenčním způsobem odpor snížit na očekávané hodnoty a práce dokumentuje princip této změny a s tím související skutečnosti.

1 Tlusté vrstvy

Pojem tlustá vrstva označuje vrstvu vytvořenou nanesením pasty nevakuumovou depoziční metodou (nejčastěji sítotiskem) na podložku a následným výpalem. Tloušťka takové vrstvy je značně větší, než je střední volná dráha elektronu. Střední volná dráha je dráha, kterou urazí částice mezi dvěma srážkami. Zpravidla se tloušťka tlustých vrstev pohybuje v desítkách μm . [1][4]

Integrované obvody tvořené pomocí technologie tlustých vrstev dnes velkou měrou nahradily obvody sestavené z klasických součástek a to zejména díky svým značným technickým možnostem. Jde o velkou pružnost při realizaci obvodu, spolehlivost a v neposlední řadě také hospodárnost takového řešení. [1]

1.1 Substráty

Substrát, nebo česky podložka, je jeden ze základních stavebních prvků obvodů tvořených technologií tlustých vrstev. Jako taková se nepodílí na elektrické funkci obvodu. Zastává funkci nosiče vrstev, popřípadě namontovaných součástek a chrání je proti mechanickému poškození, které by mohlo být způsobeno zejména vznikem tepla.

Aby podložka mohla splnit výše uvedené cíle, musí disponovat určitými dále zmíněnými vlastnostmi. Podložka musí být z kvalitního izolantu s dostatečnou elektrickou pevností, zajišťující vzájemnou izolaci vrstev. Teplotní roztažnost musí být shodná, nebo velmi podobná teplotní roztažnosti tlusté vrstvy abychom se vyvarovali popraskání, nebo oddělení vrstvy od podložky. Musí být také dostatečně hladká a rovná a nesmí měnit vlastnosti a rozměry během, či po výpalu. [2]

Jako nejčastější materiál pro podložky se používá korundová keramika s obsahem 85 až 99,9% Al_2O_3 . Taková podložka má velkou elektrickou pevnost, je velmi tvrdá, avšak také relativně křehká. Její teplotní roztažnost se dá pomocí příměsí vhodně uzpůsobit koeficientu teplotní roztažnosti veškerých používaných vodivých, odporových a dielektrických vrstev. Je také chemicky stálá a odolná proti klimatickým podmínkám. Typické vlastnosti korundové keramiky lze vidět v tab. 1.

Vlastnosti	91% Al ₂ O ₃	96% Al ₂ O ₃	99,5%Al ₂ O ₃	99,6%Al ₂ O ₃	99,5%BeO
hustota [g/cm ³]	3,72 min	3,75 min	3,86 min	3,85 min	2,88
modul pružnosti [kg/cm ² x 10 ⁶]	3,16	3,09	3,80	3,80	3,16
rezistivita (25°C) [Ωcm]	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	10 ¹⁵
rel. permitivita [1] 1 MHz 1 GHz	10,3	9,5 9,3	9,9 9,8	9,9 9,8	6,6
ztrátový činitel [1] 1 MHz 1 GHz	0.005	0,0004 0,0003	0.0001 0.0001	0,0001 0,00004	0,0004
součinitel dél. tepelné roztlačnosti 25-500°C [1/°C x 10 ⁻⁶]	7,3	7,1	7,5	7,5	7,8
tep.vodivost [W/m°C] 20 °C 100 °C 400 °C	13 12 8	26 20 12	33,5 25,5 12	35 27	259 191 80

Tab. 1: Typické vlastnosti korundové keramiky [2]

Dalšími méně používanými materiály podložek jsou například berylnatá a aluminium-nitridová keramika, steatit, forsterit, zinkové nebo hořečnaté kysličníky a vápenatá nebo borosilikátová skla. Tyto materiály nacházejí uplatnění zejména ve speciálních aplikacích, pro které je korundová keramika z nějakého důvodu nevyhovující. [1]

1.2 Pasty pro tlusté vrstvy a jejich využití

Každá tlustá vrstva, nehledě na použití, vzniká původně ze sítotiskové pasty. Tato pasta je tvořena zpravidla ze tří složek:

- **Funkční vrstva:** určuje charakter pasty a u vodivých materiálů ji tvoří částičky drahých kovů nebo částičky dielektrik či skelných frit u izolačních materiálů. Odporové vrstvy jsou tvořeny částičkami různých oxidů (např. Ru₂O) směsí drahých kovů (např. PdAg) anebo uhlíkem. Velikost částiček je zpravidla menší než 1 μm a musí být bezpodmínečně menší než velikost ok síta.

- **Tavivová složka:** je tvořena skelnou fritou, která tvoří vazbu mezi funkční složkou a substrátem. Tato nízkotavná skla mají teplotu měknutí již od 600°C. Další možností je pasta s oxidovou vazbou, u které za vysoké teploty dojde k vytvoření chemické vazby. V dnešních technologiích se velmi často používají pasty s obsahem pryskyřic a teplota vytvrzení se tím dostává na mnohem nižší hodnoty. Při tepelném vytvrzení musí dojít k měknutí, nikoliv však k roztavení, aby vznikla nosná matice pro funkční složku.
- **Pojivová složka:** zajišťuje v pastě její tiskové vlastnosti – viskozitu a tvoří ji organické látky jako např. terpineol, butyldiglykolacetát atp. Tato složka se v průběhu vypékání pasty odpaří a nemá tedy podíl na výsledné funkci pasty. [5]
[2]

S neustálým rozvojem používaných procesů a složitostí motivů dochází k vzniku mnoha nových past, které nahrazují pasty používané dříve. Tyto pasty lze dělit dle způsobu jejich tvrzení anebo dle vlastností výsledné vrstvy.

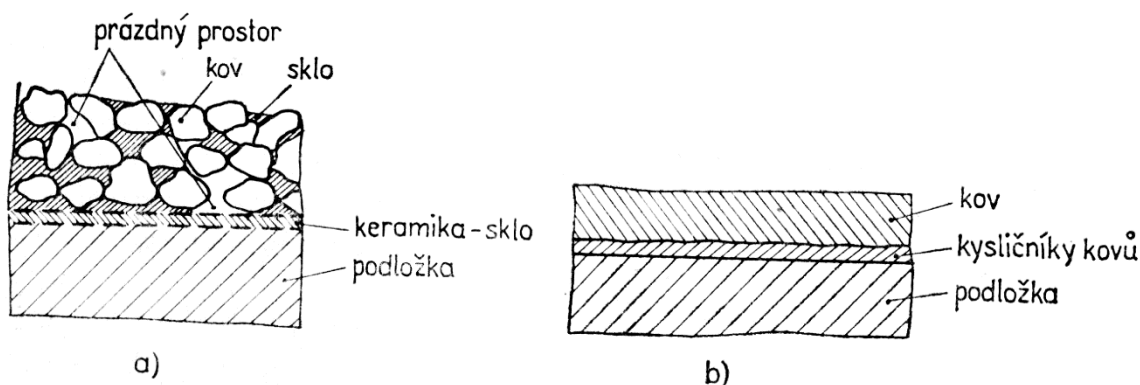
V závislosti na způsobu tvrzení lze pasty dělit jako tvrzené teplem, nebo pomocí UV záření. První skupinu tvoří pasty s širokým spektrem sekundárních složek, zejména na bázi pryskyřice anebo s oxidovou vazbou. Druhou skupinu tvoří UV tvrditelné pryskyřice. Jde téměř bez výjimky o kyseliny akrylové a metakrylové s různými polyglykoly, polyestery, epoxidy a uretany. Druhý typ past není pro účely této práce podstatný a nebude tedy dále rozebírán. [2]

Speciální kategorii v poslední době začaly tvořit nízkoteplotní sintrovací pasty na technologii MO (metal organic) s funkční složkou tvořenou nanočásticemi stříbra nebo případně jiných kovů o velikosti menší než desítky nm. Tyto pasty vytvoří po vytvrzení tlustou vrstvu s velmi dobrými elektrickými vlastnostmi. To je způsobeno jednak větším poměrným množstvím stříbra ve výsledné vrstvě a také větším počtem kontaktních ploch mezi jednotlivými vodivými částčkami, než v případě jiných druhů sítotiskových past. Z ekonomického hlediska jde o velmi nákladnou možnost avšak v mnohých aplikacích právě díky skvělým elektrickým vlastnostem obhajitelnou. [6]

1.2.1 Vodivé pasty

V tlustovrstvých obvodech se vodivé pasty používají pro vytvoření vzájemných propojení částí obvodu, na kontakty rezistorů, elektrody kondenzátorů a pro vodivé plochy k připojení diskrétních součástek a vývodních vodičů. Vrstva se stane vodivou až po jejím vypálení. Obecně je od vodivých vrstev požadována zejména dobrá vodivost, adheze k podložce, chemická a mechanická stabilita, pájitelnost a nízká cena.

Tlusté vodivé vrstvy se vytváří z pasty složené z funkční složky ve formě částic drahých kovů: stříbro, zlato, paládium nebo jejich sloučenin. U vrstev na principu skelné vazby vypálením dochází k vyhoření organické složky a slinování kovových částic se sklem. Průchod proudu se poté uskutečňuje přes kontaktní body mezi částicemi kovu, jak je ukázáno na obr. 1 a), výsledná vodivost takové vrstvy je tedy řádově menší než vodivost samotného kovu. Druhou možností jsou vrstvy chemicky spojené s podložkou pomocí kysličníků mědi a jiných. Tento druh pasty má zpravidla vysokou teplotu výpalu avšak vytvořená vrstva má velmi stabilní spojení, které je vidět na obr. 1 b). [1]

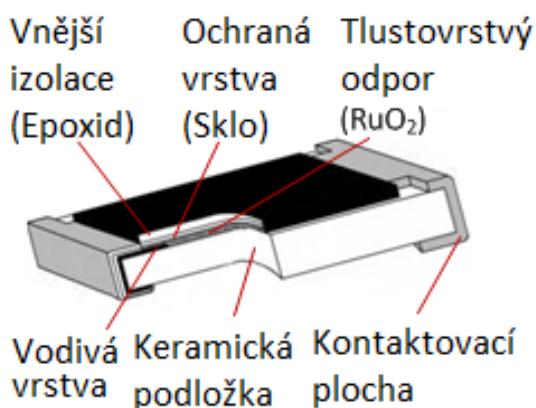


Obr. 1: Struktura vodivé vrstvy a) skelná vazba b) chemická vazba [1]

1.2.2 Odporové vrstvy

Výchozím materiálem je odporová pasta s funkční složkou nejčastěji z oxidů kovů (Ru, Ir, Os, W, In) v případě anorganických vrstev, nebo v případě polymerových past jde nejčastěji o uhlík. Požadavkem na výsledné tlustovrstvé odpory je hlavně stabilita, dobré elektrické vlastnosti, malé rozměry a hospodárnost. Odporové pasty je možné vyrobit ve velmi široké škále odporů na čtverec řádově mezi hodnotami 10^1 až $10^9 \Omega$. [1][4]

Rezistory tvořené pomocí technologie tlustých vrstev složené z oxidů kovů (např. RuO_2 , IrO_2) nanesené na keramickou destičku jsou jedny z dnes nejrozšířenějších rezistorů vůbec. Nejčastěji se prodávají ve formě miniaturního čipu ve tvaru hranolu bez vývodů určených pro povrchovou montáž pájením na plošný spoj, označují se jako SMD (surface mount device) rezistory. Jejich oblíbenost pramení zejména z jejich velmi nízké ceny a malých rozměrů. Příklad, jak vypadá tlustovrstvý SMD rezistor, je na následujícím obr. 2. [7]



Obr. 2: Struktura SMD rezistoru [7]

1.2.3 Dielektrické pasty

Dielektrické pasty jsou určeny zejména k vytváření tlustovrstvých kondenzátorů. Nejdůležitějšími sledovanými vlastnostmi jsou relativní permitivita, ztrátový činitel, izolační odpor, teplotní a kmitočtová charakteristika a stabilita. Běžná pasta je tvořena dielektrickým práškem, dnes většinou oxidem barnato titaničitým (BaTiO_3) v kombinaci se sklovinou nebo polymerem. Výsledná relativní permitivita se následně určí dle Lichtenckového vztahu

$$\log \varepsilon_r = v_s \times \log \varepsilon_{sr} + v_k \times \log \varepsilon_{kr}$$

kde v_s , v_k je objemová koncentrace skloviny a keramické části, ε_{sr} , ε_{kr} je relativní permitivita skla a keramiky. [1]

Kondenzátory vytvořené klasickými metodami tvorby tlustých vrstev jsou limitované zejména z důvodu omezených možností tisknutelných rozměrů a tím relativně nízkou kapacitou. Proto se v dnešní době přechází k tisku pomocí technologie laser

structuring, která dovoluje dosáhnout větších kapacit a také je taková výroba mnohem méně časově náročná. [11]

1.2.4 Speciální pasty

Existuje mnoho dalších druhů past, jejichž použití není tak masové, jako u předcházejících případů, avšak své použití si naleznou ve speciálních aplikacích.

Příklady dalších druhů past a jejich použití:

- Izolační a ochranné pasty pro tvorbu ochranných vrstev
- Termorezistivní (PTC a NTC rezistory, nízkoteplotní termistory)
- Citlivé na vlhkost (polymerní sloučeniny, cermetové pasty)
- Chemicky citlivé (pevné elektrolyty, kovové oxidy SnO_2)
- Biocitlivé (polymerní lože s receptorovými částicemi)
- Magnetorezistivní na bázi Ni
- Feromagnetické
- Pyroelektrické (PVDF)
- Piezoelektrické (cermetové piezoelektrické pasty, PFT)
- Mnoho dalších např. vysokoteplotní supravodiče atd. [8]

1.3 Technologie nanášení tlustých vrstev

Způsoby nanášení pasty a tedy vytváření tlusté vrstvy stále prochází stejně jako složení past neustálým vývojem. Důraz na kvalitu přenosu výsledného obrazce a také finanční náklady na výrobu tlustých vrstev nechaly vzniknout mnoha technologiím a některé z nich budou popsány v následující kapitole.

Od vzniku původních technik tisku se sice výčet možností značně rozrostl, avšak i dnes se ve značné míře používá základní technologie, tj. sítotisk, který je díky své jednoduchosti a cenové nenáročnosti stále jasnou volbou pro velkou část aplikací.

Další hojně používanou metodou a logickým pokračovatelem sítotisku je tisk šablonový, kde úlohu síta přebrala fólie z různých materiálů. Tato technologie boduje zejména větší přizpůsobitelností a snadnější obměnou různých motivů folie.

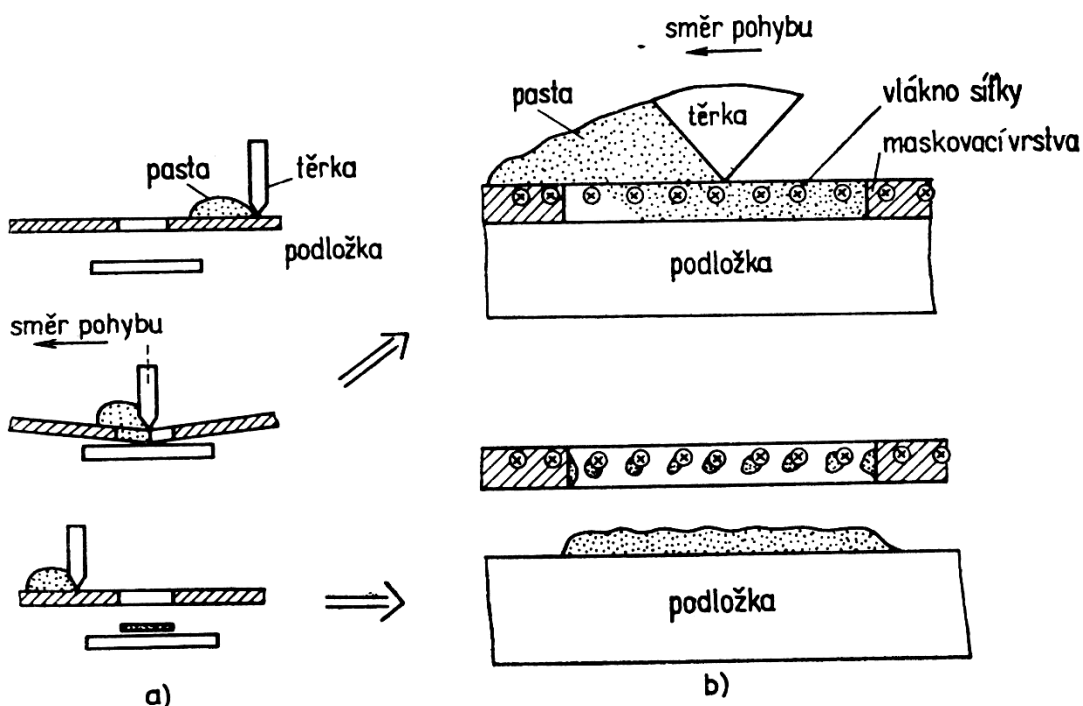
Mezi další technologie patří například dispensing a jetting, které jsou sice cenově náročnější, ale dále rozšiřují možnosti využití tlustých vrstev v různých výrobních procesech. [2]

1.3.1 Sítotisk

Jak už bylo řečeno v úvodu, sítotisk, jako jedna z prvních technologií nanášení tlustých vrstev, je stále hojně rozšířeným způsobem výroby vyhovujícím z hlediska výkonosti a hospodárnosti. Technologie původně užívaná k nanášení leptuvzdorných rezistů se dnes používá pro mnohá další media, jako jsou pájecí pasty, lepidla, fotorezistory apod. [2]

Princip této technologie spočívá v protlačování pasty volnými otvory obrazce vytvořeného na sítotiskové šabloně umístěné ve vzdálenosti několika desetin milimetru od podložky. Pasta je protlačována sítem pomocí těrky. Po nanesení pasty na sítotiskovou šablonu dojde k zaplnění ok síťky a tlakem těrky dojde k jejímu protlačení na podložku. Jakmile těrka mine tiskové otvory, síťka se od podložky vlivem pružných sil oddálí a vrátí se do původní polohy. Viskozita, povrchové napětí pasty, smáčivost podložky a síta, tvar, sklon a poddajnost těrky určuje množství pasty nanesené na podložku.

Základní části systému pro sítotisk tvoří sítotisková šablona, těrka s pohyblivým mechanismem a vlastní potiskovací stroj s držákem podložky, který umožňuje vzájemné nastavení polohy podložky vzhledem k šabloně ve všech třech osách. [1]



Obr. 3: Princip sítotisku a) jednotlivé fáze tisku, b) detail přenosu pasty [1]

1.3.1.1 Zařízení pro sítotisk

Různá zařízení pro sítotisk lze rozdělit například podle způsobu obsluhy systému. Zařízení pro ruční tisk, jehož příklad je vidět na obr. 3, kdy obsluha pohybuje těrkou vlastní silou je z principu jednodušší. Takové zařízení se bude skládat z konstrukce, která umožní uložení podložky a nastavení její polohy vzhledem k sítu, a to jak vodorovně, tak i do výšky od síta. Je nezbytné, aby konstrukce také umožnila uchycení podložky proti samovolnému pohybu například tlakem těrky. Toho lze dosáhnout jednak zarážkami, kterým bude podložka dosedat a také například pomocí vytvoření podtlaku a přísátím podložky pomocí externího sacího zařízení. Další část bude tvořit systém posuvu těrky, která bývá většinou upevněná na ližinách nebo tyčích a úchyt pro pohyb těrkou rukou.

Ruční zařízení pro sítotisk samozřejmě nikdy vlivem lidského faktoru nedosáhne tak vysoké reprodukovatelnosti výsledků a nízké chybovosti, jakou bude mít přístroj automatický. Využívá se však zejména pro výrobu v menších sériích, anebo pokud jsou hlavním kritériem pořizovací náklady na zařízení.



Obr. 4: Ukázka ručního zařízení pro sítotisk [9]

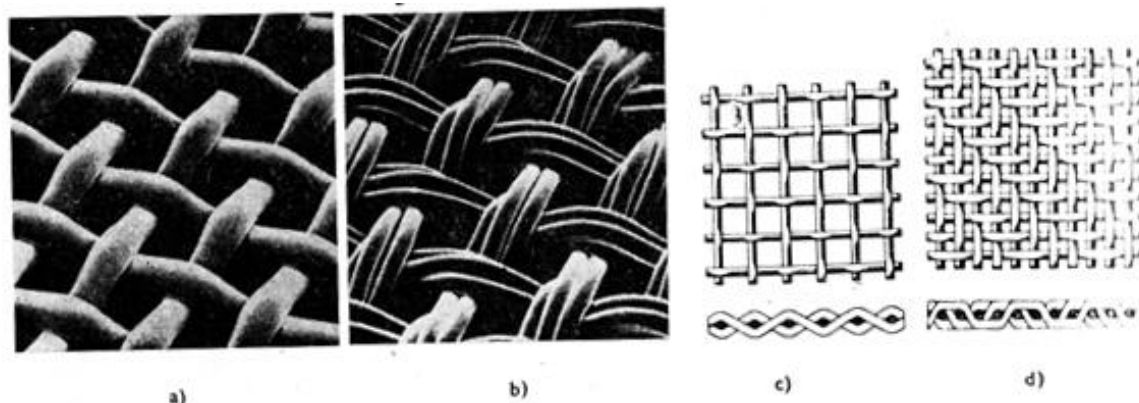
Poloautomatická a automatická zařízení jsou již značně komplikovanější, a tedy i dražší, poněvadž musí také zajistit pohyb těrky a nastavení její rychlosti a přtlaku dle požadavků obsluhy. Takové systémy však samozřejmě dosáhnou vyšší kvality a jednotnosti výsledných motivů. [2]

1.3.1.2 Síta

Kvalita, stáří a provedení síta značnou měrou ovlivňuje kvalitu výsledné tlusté vrstvy. Síťové šablony jsou vytvořeny z rámu, na který je napínáním uchycena síťovina z polyesterových vláken anebo nerezové oceli. Rámy byly dříve vyrobeny ze dřeva a síťovina se na nich napnula nalepením a někdy dokonce pouze sponami na stranu rámu. Dnes se rámy vyrábějí zejména z hliníku a také z oceli, které lépe odolávají tahu síťoviny. Ta se na ně napne například pomocí pneumatického napínacího zařízení nebo jiných mechanických systémů.

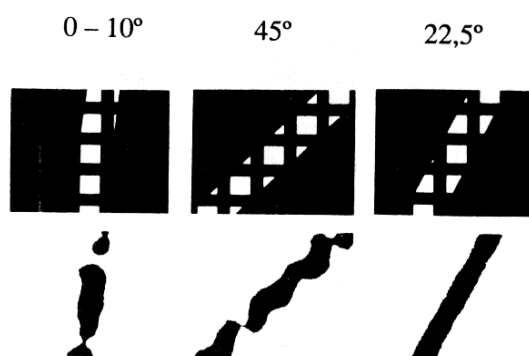
Materiál tkaniny pro vytvoření síťoviny se vybírá dle druhu pasty, která bude nanášena a podle požadavků na rozměr a přesnost požadovaného motivu. Aby byl zajištěn dobrý průchod pasty síťovinou, musí být velikost jednotlivých ok motivu 2,5 až 3 krát větší než velikost částic použité pasty.

Sítovina tvořená z polyesterových vláken má dobré vlastnosti pevnosti v tabu a po protažení v mezních možnostech materiálu se bez problémů vrátí do původní podoby. Tkaniny z ocelových vláken mají téměř nulovou pružnost, avšak jsou velmi rozměrově stabilní. To samozřejmě ztěžuje dosažení správného přitlaku těrky, a pokud se nepovede nastavit ideální podmínky, může dojít k poškození těrky anebo i samotného síta. Možné je i provedení v kombinaci kovového jádra potaženého vrstvou polyesteru. Vlastnosti takového síta jsou kompromisem mezi vlastnostmi jednotlivých řešení. [2]



Obr. 5: Struktura síťovin a) polyester monofilní, b) polyester multifilní, c) ocel s hladkou vazbou, d) ocel s keprovou vazbou [1]

Přesnost tisku výsledného motivu závisí zejména na správné volbě velikosti ok, poměru formátu rámu a obrazce, šíře a délky dráhy těrky a vzdálenosti síta od podložky. Stejně důležité je i zachování elasticity použitého síta, ta se může narušit příliš velkým tlakem těrky, nebo nevhodným napnutím tkaniny do rámu. Další parametr, který značně ovlivňuje tvar okrajů motivu je také úhel směru jednotlivých vláken síťoviny a tištěného motivu, jak je ukázáno na obr. 5. Experimentálně bylo zjištěno, že ideální úhel natočení je $22,5^\circ$. [2]



Obr. 6: Vliv úhlu natočení na síta a obrazce [1]

Vzdálenost síta od povrchu podložky, na kterou se obrazec tiskne – tzv. odtrh, je dalším důležitým parametrem ovlivňujícím kvalitu výsledku. Ten spolu s mírou napnutí síta a velikostí tlaku vynaloženého na těrku do značné míry určuje věrnost zobrazení daného motivu. Při malém odtrhu a vysoké tekutosti pasty může dojít při pomalém pohybu těrku k protečení mimo motiv a naopak při velkém odtrhu a nedostatečném tlaku na těrku může být množství nanesené pasty příliš malé a v extrémním případě nemusí být výsledný motiv spojitý. [2]

1.3.1.3 Tvorba vrstvy

Samotnou tvorbu nanášené vrstvy lze rozdělit do tří jednotlivých fází. Jsou to tisk, uzavírání plochy a sušení.

V první fázi jsou na povrchu podložky vytvořeny protlačením pasty přes oka síta kvádry pasty o rozměrech daných velikostí ok a tloušťkou jednotlivých vláken tkaniny, z které je síto tvořeno.

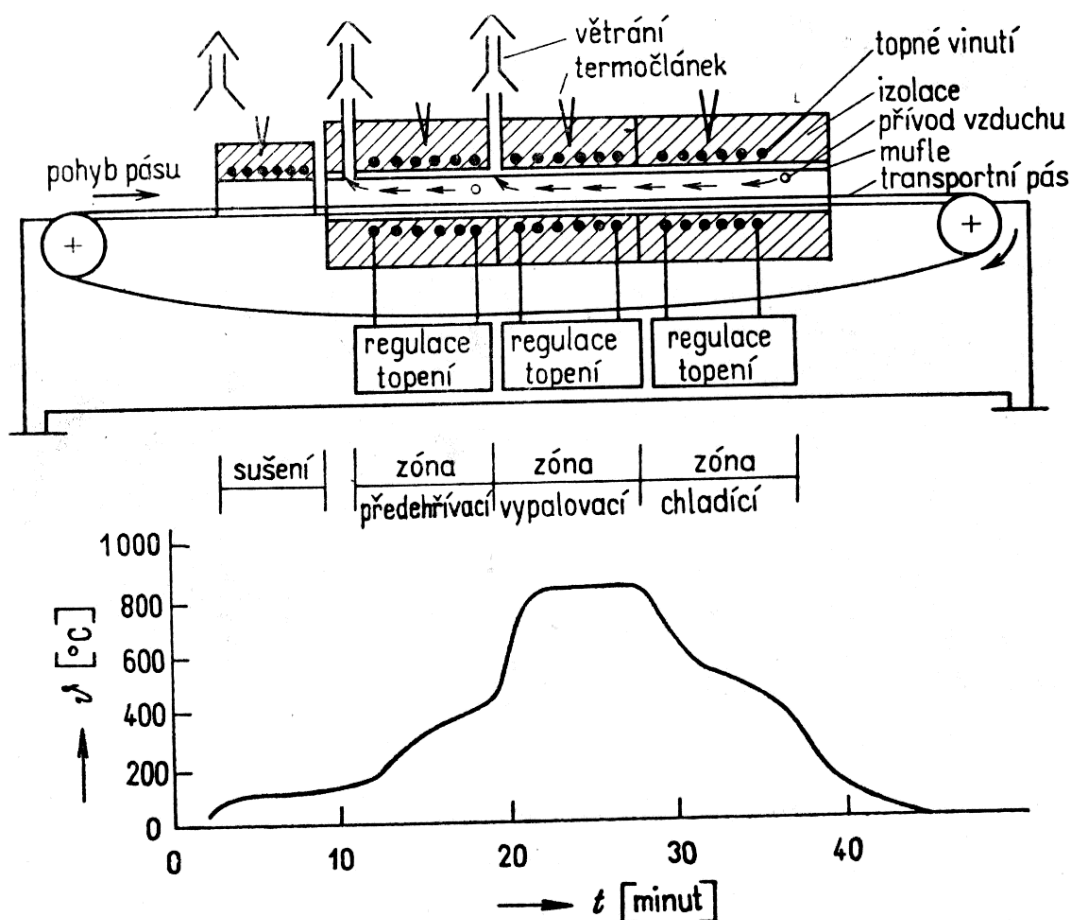
Uzavírání povrchu nanesené plochy je slévání vytištěných kvádrů materiálu do jednolitého obrazce. Sníží se tedy výška kvádrů a dojde k vyplnění otvorů způsobených vlákny síta. Při správně nastavených parametrech zařízení a dobrém provedení samotného tisku se díky viskozitě pasty vytvoří jednolitá vrstva materiálu bez mezer a bublin. Výsledná tloušťka vrstvy je tedy závislá na tloušťce vláken, velikosti ok, tekutosti pasty a na struktuře povrchu podložky.

Sušením se dále z takto natištěné vrstvy vypaří těkavé složky pasty. Správnou dobu sušení lze odhadnout, pokud známe podíl a druh těkavých látek obsažených v pastě. [2]

1.3.1.4 Tepelné zpracování

Natištěnou a vysušenou pastu je pro její funkčnost potřeba vypálit. Způsob výpalu včetně teploty a jeho doby je dán typem pasty. Při výpalu dochází k chemické reakci jednotlivých komponent a k pevnému spojení s podložkou. Výška teploty vypalování anorganických past je zpravidla okolo 800°C a v případě past polymerových se většinou doporučené teploty pohybují okolo 150 až 200°C. Ve většině případů se pro výpal

používají pece tunelové. V ojedinělých případech je použita muflová pec, která se však většinou používá pouze v laboratorních podmínkách. Schematický průřez tunelovou pecí včetně vzorového průběhu teploty při výpalu anorganické pasty je vidět na obrázku 6. [1]



Obr. 7: Schéma tunelové pece a časový průběh teploty [1]

1.3.2 Šablonový tisk

V případě šablonového tisku se k průchodu pasty a vytvoření požadovaného vzoru použije místo síta folie s otvory. Princip tisku je shodný se sítotiskem avšak výsledná vrstva bude mít pozměněny některé vlastnosti. Například tloušťka vrstvy je v tomto případě přímo daná tloušťkou použité folie a dá se tedy mnohem jednodušeji nastavit. Výsledný motiv je také jednodušší a přesnější než v případě sítotisku. Zejména vhodné je použití pro tisk drobných motivů, které by sítotisk nedovoloval z důvodu tloušťky vláken síta.

Folie může být vyrobena jednak z kovu např. oceli, mosazi, mědi apod. a také z plastových materiálů. Druh kovu je třeba zvolit vzhledem k nárokům na životnost, chemickou stálost vzhledem k typu použité pasty, nebo dne zvoleného způsobu vytváření vzoru na folii. Plastové materiály jsou zajímavé zejména z hlediska své ceny, která je neporovnatelně nižší než u varianty z kovů.

Vzory lze na folie vytvořit několika způsoby, které se liší svou cenou, přesností a možnou velikostí otvorů. Na technologii nejméně náročným způsobem je leptání. To má však značná omezení zejména na minimální průměr vytvořených otvorů, které by neměly být menší než je 150% šířky folie, což limituje možnosti použití pro součástky s malými rozměry. Dalším příkladem technologie pro výrobu šablon je řezání laserem. Oproti leptání lze dosáhnout větší přesnosti a také menších průměrů otvorů a proto pokud není hlavním kritériem cena jde o upřednostňovanou technologii. [1]

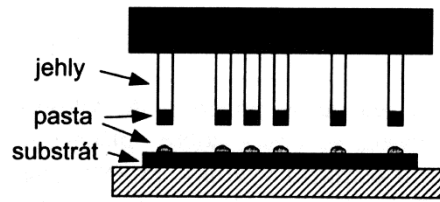
1.3.3 Dispensing

Dispensing je v principu metoda nanesení pasty dotykem, nebo vytlačěním ze zásobníku. Lze ji použít nejen na vytváření klasických struktur, ale i pro tvorbu jednotlivých bodů. Existuje mnoho variací této technologie avšak základní dělení je na tzv. writing a jetting tedy česky psaní a tryskání. České názvy jsou nepraktické a většinou se tedy v literatuře používá anglické označení. [2]

1.3.3.1 Writing

Existuje více způsobů realizace této technologie. Nejzákladnějším je přenos past plnými jehlami různých tvarů. Hlava s jehlami se vnoří do pasty a poté se hlava přesune nad podložku. Dotykem pasta skápně a vytvoří ovrstvenou plochu jejíž rozměry jsou závislé na viskozitě, tvaru jehly a množství nabrané pasty. Tento způsob je sice velmi jednoduchý avšak pomalý a relativně nepřesný.

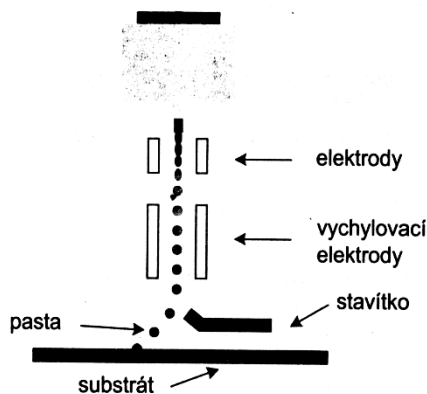
Druhou možností je nanášení vytlačováním pasty dutou jehlou. Tlačení pasty přes tyto jehly může být řešeno jednak pneumaticky a také například pomocí šroubového systému. Tento způsob je díky vynechání fáze namáčení mnohem rychlejší a množství nanesené pasty se také lépe řídí.[2]



Obr. 8: Dispensing pomocí jehly [2]

1.3.3.2 Jetting

Příkladem zdokonalené, avšak také technologicky mnohem komplikovanější formy dispensingu je tzv. jetting. Ten zjednodušeně řečeno spočívá v řízení dráhy letu kapky vypuštěné ze zásobníku pomocí elektromagnetického pole. Tento způsob nanášení pasty je značně přesný, v porovnání s writingem také nesrovnatelně rychlejší a lze takto nanášet motivy s menším průměrem. [2]

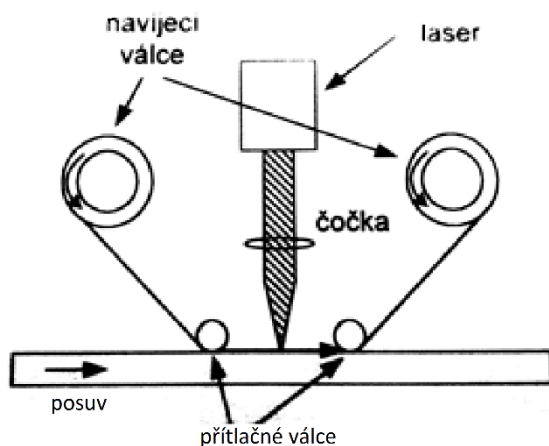


Obr. 9: Princip jettingu [2]

1.3.4 Laser structuring

Laser structuring tedy česky strukturování laserem je jedna z relativně nových, avšak dnes již ve výrobě používaných technik nanášení tlustých a případně i tenkých vrstev. U této technologie máme konstrukci s odvíjejícím se filmem, na kterém je nanášena vrstva pasty o požadované tloušťce. Po vystavení filmu laseru se tato vrstva oddělí a přichytí se na podložku, která se pod ním pohybuje na pásu. Výsledkem je velmi přesná

struktura. Vzhledem k možné dosažitelné rychlosti se tento způsob hodí na velkou sériovou výrobu jednovrstvých struktur. [10] [12]



Obr. 10: Ovrstvení pastou z folie pomocí laseru [2]

Mezi hlavní výhody této technologie je přesnost takto nanesené vrstvy. Ta má jednak velmi přesně definované okraje a také nízkou členitost povrchu. Další výhodou je, jak už bylo řečeno, vysoká dosažitelná rychlost výroby a výroba součástek tímto způsobem je tedy i relativně cenově efektivní. Takto vytvořené struktury jsou defektní pouze výjimečně a není tedy problém takto nanášet i velké počty struktur na jednu podložku.

Typickým využitím této technologie je v dnešní době tvorba ITO (indium tin oxide) struktur, které se používají například v displejích tvořených organickými elektroluminiscenčními diodami (OLED). Velký potenciál má i využití v elektronice na ohýbatelné podložce např. v dnes často zmiňovaných ohýbatelných displejích. [13] [14]

2 Vlastnosti tlustých vrstev

Aby systém vytvořený pomocí tlustovrstvé technologie splňoval požadovanou funkci je třeba vzít v úvahu mnoho faktorů, které určují jednak okamžité elektrické, mechanické a tepelné vlastnosti a také další dlouhodobé vlastnosti jako je životnost. To je velmi nesnadný úkol a je proto nutné použít takovou technologii a materiály, které dokáží daný typ aplikace uspokojivě zvládnout.

2.1 Elektrické vlastnosti

Nároky na elektrické vlastnosti lze dělit z hlediska substrátu a také vlastností samotné tlusté vrstvy. Nejdůležitější elektrickou vlastností substrátu je vnitřní a elektrická rezistivita. V dnešní době na ni kladou elektronické součástky stále větší požadavky a tak se lze často setkat z hodnotami v řádu $10^{15} \Omega$. Mezi další důležité vlastnosti substrátu patří například relativní permitivita a ztrátový činitel. Ty jsou zásadní zejména při použití pro vyšší frekvence.

V případě samotné funkční vrstvy je samozřejmě nejdůležitější ta vlastnost, kvůli které je vrstva aplikována, může jít například o vysokou vodivost, odpor, proudovou zatížitelnost apod. Pokud budeme vrstvu používat na vyšších frekvencích, začne poté záležet i na tvaru a rozmístění motivů což návrh dále zkomplikuje.

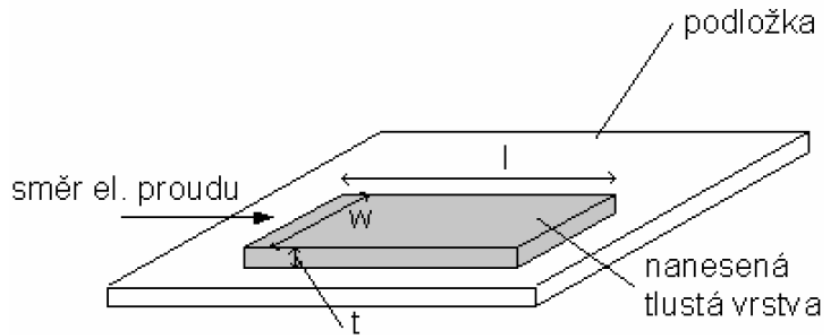
Stejně důležitá je však i stabilita těchto elektrických vlastností a to jak v závislosti na teplotě, tak i na vlivech prostředí jako je vlhkost a znečištění prachem. Často je tedy vhodné před těmito vlivy tlusté vrstvy alespoň částečně chránit například jejich opouzdřením. [2]

2.1.1 Odpor na čtverec

Jedním z parametrů, s kterým se nejčastěji setkáváme u tlustých vrstev, je odpor na čtverec. Tato hodnota vyjadřuje velikost odporu čtvercové vrstvy s danou tloušťkou. Pro její zjištění je třeba znát odpor a rozměry vrstvy. Pokud hodnotu odporu na čtverec známe, lze z ní spočítat například vodivost této vrstvy. [4]

$$R_{\square} = R \times \frac{w}{l}$$

Kde R_{\square} je vypočtený odpor na čtverec, R je změřená hodnota odporu, w je šířka vrstvy a l její délka, jak je vidět na obr. 10.



Obr. 11: Rozměry tlusté vrstvy [4]

Pokud bychom se podívali do prospektů výrobců past pro tlusté vrstvy, často se setkáme s hodnotou odporu na čtverec s jednotkou $\Omega/\square/\text{mil}$. Ta byla zavedena z důvodu zpřehlednění hodnot a udává odpor na čtverec při tloušťce 10^{-3} palce, tedy $25,4\mu\text{m}$. Orientačně lze tuto hodnotu přepočítat i na jinou tloušťku vrstvy, avšak takový přepočet nebude naprosto přesný, protože s měnící se tloušťkou se může měnit i mnoho dalších faktorů.

2.2 Tepelné vlastnosti

Mnoho součástek vyrobených technologií tlustých vrstev je velmi citlivých na jejich provozní teplotu. Parametry takto tvořených celků se s teplotou více či méně liší. To může ovlivnit nejen jejich správnou funkčnost, ale i jejich spolehlivost a je tedy nutné je správně chladit. Zvláště u celků tvořených povrchovou montáží (STM – surface mount technology) jsou z důvodu husté montáže součástek na relativně malé ploše a vyššího odporu vodivých cest z důvodu jejich menších rozměrů kladeny na chlazení velké nároky.

Odvod tepla se různou měrou dělí mezi vedení, proudění a sálání. Vedením se teplo šíří mezi místy s různou teplotou a tyto teploty se postupně vyrovnávají. To má největší význam hlavně u jednodušších obvodů a často spolu s přirozeným prouděním vzduchu pro uchlazení stačí. Pro zlepšení odvodu tepla vedením je vhodné použít například větších rozměrů materiálu a podložek nebo různých pasivních chladičů. Proudění je další významný způsob chlazení, kdy se může využít buď přirozeného proudění vzduchu anebo nuceného oběhu. Nuceného proudění se docílí díky externímu ventilátoru, který bude ofukovat podložku s nanesenou vrstvou. Je třeba si také uvědomit, že se tímto způsobem může na určitých částech rychleji usazovat prach, který sníží účinnost chlazení a také může

způsobit různé poruchy. Vzduch je tedy třeba filtrovat, nebo přinejmenším chlazení a funkční celek od prachu v určitých intervalech vhodně čistit. Posledním způsobem je sálání, které pro svou nízkou účinnost v elektronice nemá velkou využitelnost. [2]

2.3 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti použitých materiálů jsou pro správnou funkčnost a také životnost dalším velmi důležitým faktorem. Prvním požadavkem budou mechanické vlastnosti podložky jako je rovinnost povrchu, které do značné míry určují výslednou kvalitu nanesení a přilnutí tlusté vrstvy. Další vlastnosti jako tepelná roztažnost podložky a nanesené vrstvy se projeví zejména při provozu.

Poměr tepelných roztažností použitých materiálů hraje značnou roli a špatná volba materiálů tedy může vest k poruchám. Pokud se materiály budou s ohřevem rozpínat různou rychlostí, dojde k pnutí a vrstva naneseného materiálu se může od podložky oddělit, nebo popraskat. Stejně tak součástky vytvořené technologií tlustých vrstev se v případě různé tepelné roztažnosti od podložky mohou oddělit od pájky, která je spojuje.

3 Zhotovení a měření tlustovrstvých vzorků

Tato kapitola se bude zabývat samotnou praktickou částí práce. Rozebereme postupy použité při vytváření vzorků z vodivých a odporových past pomocí sítotisku, dále způsob jejich měření a zjištěné výsledky vyhodnotíme.

Z každé použité pasty byla vyrobena sada celkem 180 vodivých, nebo odporových cest na 36 keramických podložkách. U každé cesty byl změřen odpor a u 120 cest z každé sady také tloušťka dané vrstvy. Měření tloušťky bylo časově velmi náročné, a proto jsem přistoupil k zredukování měřených vzorků na dvě třetiny celkového počtu, což se zdálo jako rozumný kompromis bez ovlivnění kvality výsledků.

Z těchto naměřených hodnot byly vypočteny hodnoty odporu na čtverec a dále vodivosti pro jednotlivé tloušťky vrstvy. Speciální pozornost byla věnována vzorkům z pasty Paron 350 u kterých se objevily neočekávané výsledky a zajímavé vlastnosti.

3.1 Použité pasty

Pro realizaci vzorků byly použity čtyři pasty z toho tři vodivé stříbrné a jedna odporová uhlíková pasta. Jak už bylo řečeno, každá tato pasta byla nanášena přes síto na celkem 36 keramických podložek. Dále vypsány hodnoty jsou vyňaty z data sheetu jednotlivých past. Všechny pasty jako své hlavní charakteristiky uváděly skvělou pružnost a nízkou členitost povrchu výsledné vrstvy.

Použité pasty:

Paron 920

- Uhlíková odporová pasta
- Odpor na čtverec $40 \Omega/\square/\text{mil}$
- Viskozita $20 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- Vypalování 130°C po dobu 30~60 min

CSP-3110D

- Stříbrná vodivá pasta
- Odpor na čtverec $< 20 \text{ m}\Omega/\square/\text{mil}$
- Viskozita $15 \pm 5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- Vypalování 130°C po dobu > 20 min

Paron 910

- Stříbrná vodivá pasta
- Odpor na čtverec $15\sim 50 \text{ m}\Omega/\square/\text{mil}$
- Viskozita $15 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- Vypalování 130°C po dobu 30~60 min

Paron 350

- Nízkoteplotní sintrovací vodivá pasta (Ag)
- Odpor na čtverec $2 \text{ m}\Omega/\square/\text{mil}$
- Vypalování 150°C po dobu 20 min

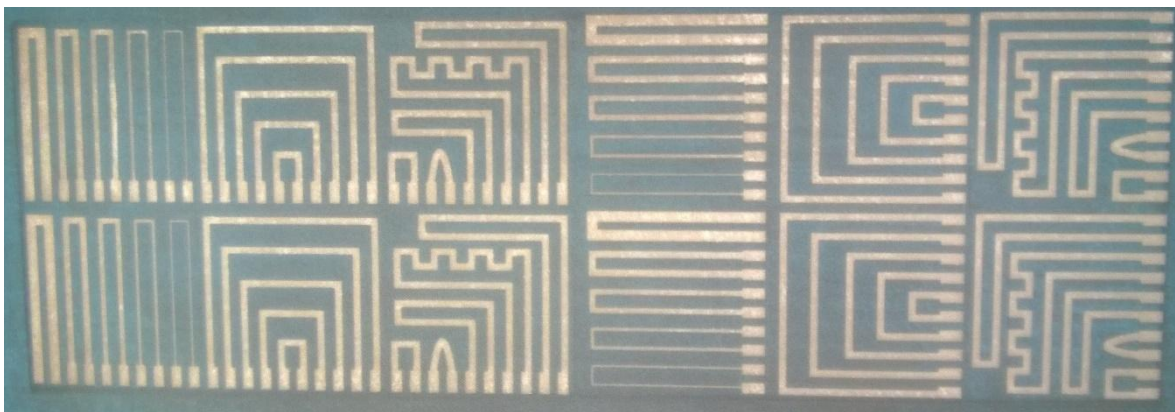
3.2 Postup tvorby tlustých vrstev

Jak už bylo řečeno, testované vrstvy byly nanесeny na korundové destičky za pomoci ručního sítotisku přes síto tvořené polyesterovými vlákny a poté vypáleny v peci s odporovým ohřevem dle požadavků výrobce pasty. Tato kapitola se věnuje způsobu tvorby těchto vzorků a použitými komponenty.

3.2.1 Tisk

Vybraná pasta byla nanесena přes zařízení pro sítotisk Uniprint, které je vidět na obr. 3. Jde o zařízení s ručním posuvem těrky, která se pohybuje po ližinách. Podložky se pokládají na děrovanou pracovní plochu, která je posuvná po všech třech osách. Přidržení podložky je řešeno pomocí zarážky a podtlaku, který vytváří vysavač připojený pod pracovní plochu.

Jako substrát byly použity destičky z korundové keramiky o rozměrech 25 na 25 mm a o tloušťce 0,4 mm. Tyto destičky byly zespodu pomocí lepicí pásky pospojovány do sad o dvanácti destičkách tak, aby odpovídaly motivu na použitém sítu, který je vidět na obr. 11. Každá z těchto sad byla pojmenována písmenem A, B, C a jednotlivým destičkám bylo přiřazeno číslo 1 až 12 dle umístění. Každou destičku a na ní nanесenou tlustou vrstvou lze tedy označit příslušným názvem např. Paron 910 A11 vrstva 5. Detailní informace o značení a rozměrech jednotlivých motivů jsou uvedeny v kapitole 3.3.1.

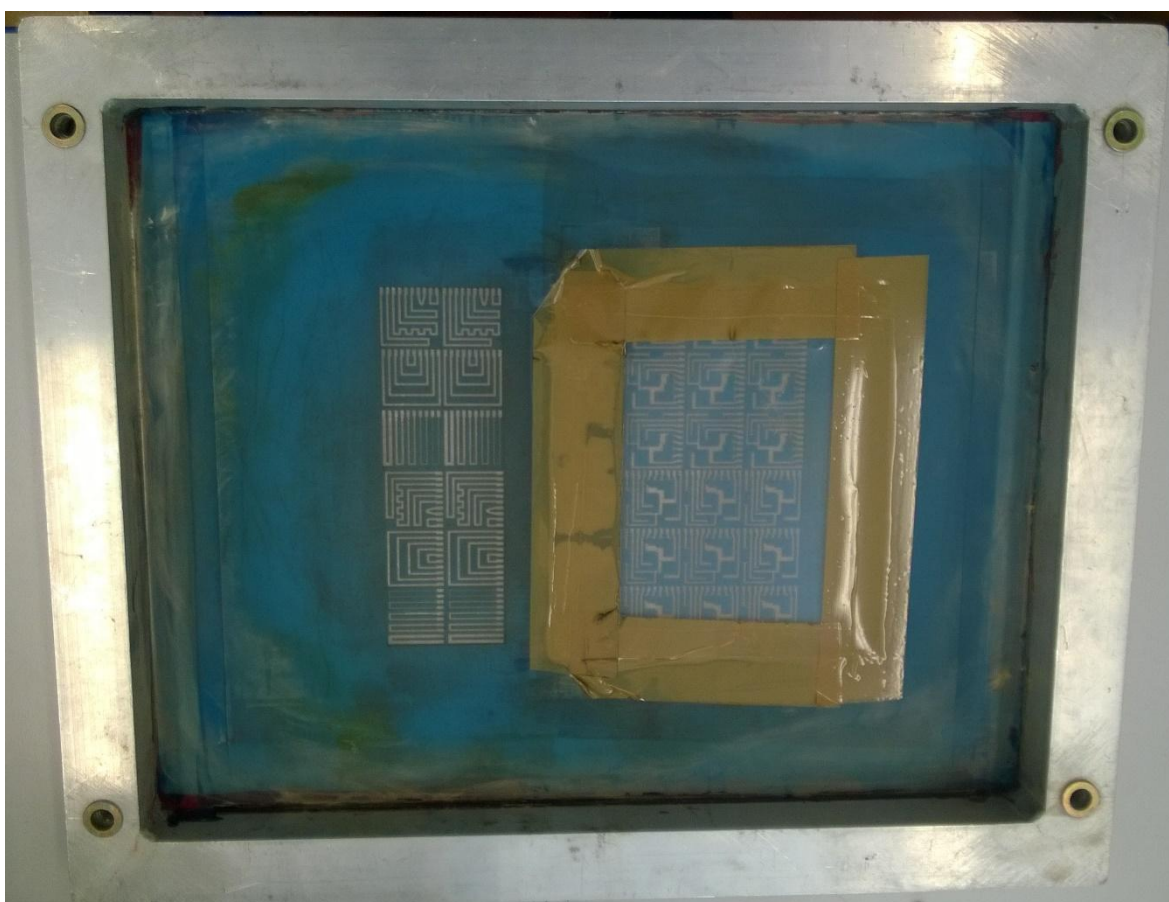


Obr. 12: Motivy síta

Použité síto (obr. 12) bylo uchyceno na hliníkovém rámu a vyrobeno z polyesterových vláken tloušťky 75 μm o hustotě 65 vláken na cm délky. Rám se upevňoval

do sítotiskového zařízení pomocí čtyř šroubů. Motiv byl proti směru vláken natočen v úhlu 22,5°. [2]

Toto síto bylo již dříve hojně využíváno při výuce předmětů zabývajících se tlustými vrstvami a nebylo již v ideálním stavu. Při vizuální kontrole se zdálo příliš prověšené a některé otvory v motivech byly od předchozího používání ucpané. Bohužel nebylo možno využít jiné síto a i přes velkou snahu se ucpané otvory nepodařilo zcela vyčistit. Stáří a kvalita síta se tedy projeví do kvality výsledných vrstev zejména neprotečením pasty do všech míst, nebo naopak protečením mimo motiv což znehodnotilo některé cesty, jak bude rozebráno v kapitole 3.4.1.



Obr. 13: Použité síto pro tlustovrstvý tisk

Samotný průběh tisku lze rozdělit do následujících kroků.

- Vložíme sadu podložek na pracovní plochu, zapneme sání pomocným čerpadlem a seřídíme polohu posuvem pracovní plochy tak, aby se síto s podložkami ideálně krylo.
- Naneseme malé množství pasty na síto vedle motivu a rozprostřeme na čáru délkou přibližně odpovídající délce motivu.
- Rozetřeme pastu přes motiv pohybem třerkou tam a zpět.
- Odklopíme síto a vyjmeme destičku s nanesenou vrstvou.
- V případě že je třeba vytvořit další vrstvy, se postup opakuje s další sadou podložek.
- Pokud další vrstvy nepotřebujeme, síto vyjmeme a zbylou pastu důkladně očistíme.

3.2.2 Vypálení

Natištěné vrstvy bylo následně třeba vypálit. K tomu účelu byla použita laboratorní pec s odporovým ohřevem SPT 200, která je vidět na obr. 13. Destičky se na kovové podložce vložily do pece a vypalovali dle požadavků výrobce pasty.

- Paron 920: 130 °C po dobu 40 min
- CSP-3110D: 130 °C po dobu 30 min
- Paron 910: 130 °C po dobu 40 min
- Paron 350: 150 °C po dobu 20 min



Obr. 14: Použitá pec s odporovým ohřevem

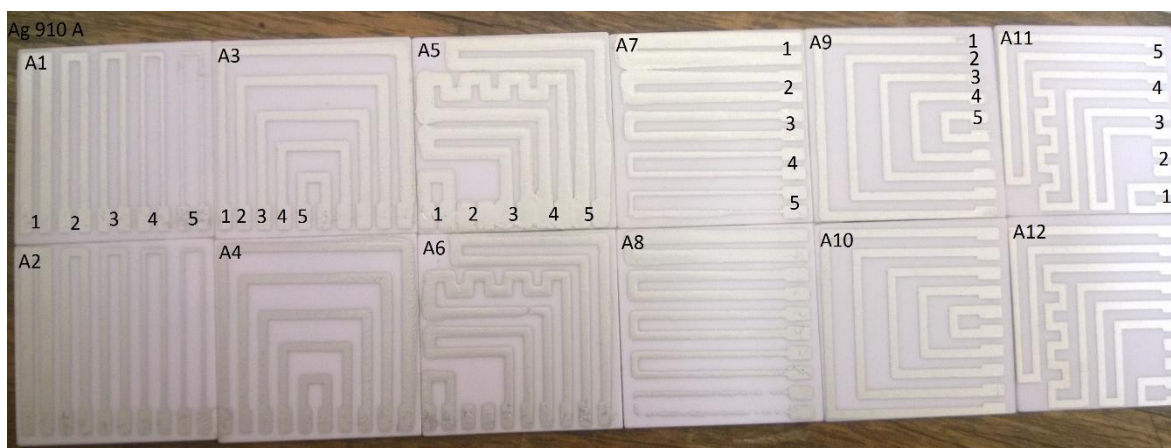
3.3 Měření připravených vzorků

Natištěné vzorky byly podrobeny vizuální kontrole, která je detailněji rozebrána v kapitole 3.4.1, na vyhovujících vzorcích byl měřen odpor a tloušťka vrstvy. Následující podkapitoly se věnují pouze způsobu měření a jeho výsledky jsou zhodnoceny v kapitole 3.4.3.

3.3.1 Značení a teoretické rozměry vzorků

Pro orientaci a rychlejší práci se vzorky je bylo potřeba označit. Jak už bylo řečeno, z každé pasty bylo natištěno 36 korundových podložek a každá měla 5 vodivých, nebo odporových cest ve tvaru dle jednoho ze tří motivů. Tyto podložky byly po 12 zespony spojeny lepicí páskou. Každá tato sada 12 podložek z jedné pasty byla následně označena písmenem A, B, nebo C.

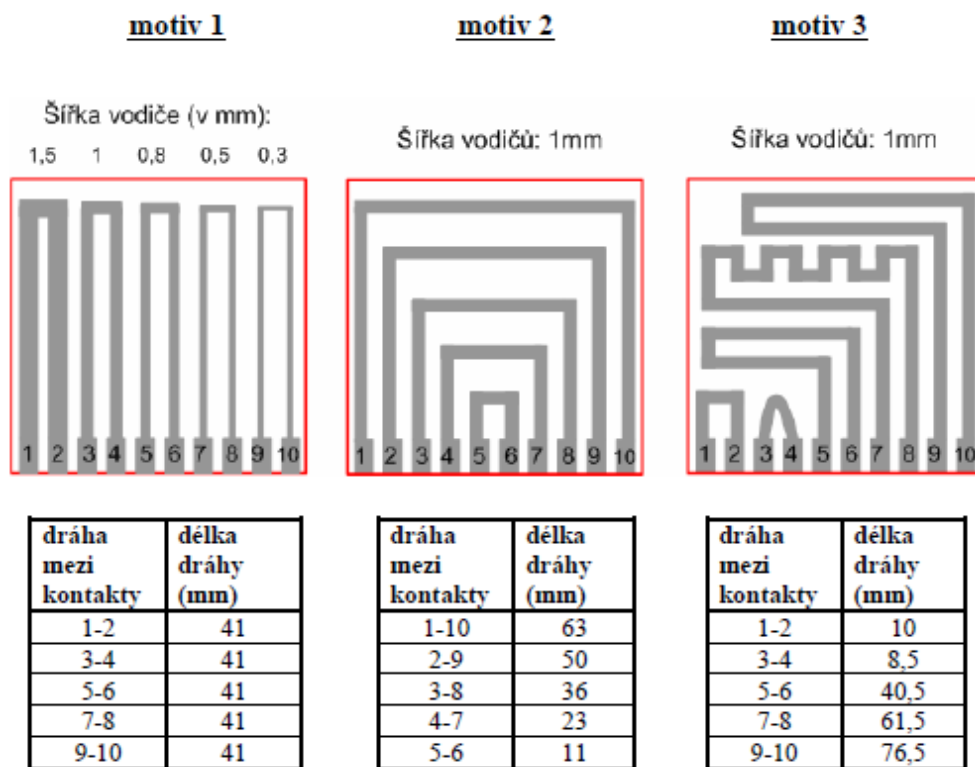
Dále bylo třeba označit jednotlivé destičky a jejich cesty. K označení jednotlivých destiček v sadě bylo použito číslo od 1 do 12 dle relativního umístění destičky vzhledem k ostatním a každá z nich ležících cest byla označena číslem 1 až 5, jak je vidět na obr. 14.



Obr. 15: Příklad značení destiček (na obr. vzorky Paron 910 sada A)

Jak je vidět na výše uvedeném obrázku vzorky jsou rovnoměrně rozloženy mezi tři rozdílné motivy. U každého z těchto motivů máme zadány jeho teoretické rozměry, jak je vidět na obr. 15, za jejichž pomoci lze v kombinaci s naměřeným odporem zjistit hodnotu

odporu na čtverec. Zejména reálná šířka vytvořené vrstvy samozřejmě nebude přesně odpovídat teoretické hodnotě a pro některé výpočty byly tedy použity hodnoty naměřené pomocí talystepu.



Obr. 16: Teoretické rozměry použitých motivů [4]

3.3.2 Měření odporu

Odpor byl měřen v závislosti na jeho velikosti multimetrem HP 34401A, nebo miliohmmetrem HP 4338B. Vodivé vrstvy měly odpory v některých případech menší než 1 Ω a pro omezení nepřesnosti byly tedy až na výjimky všechny měřené na miliohmmetru. U odporových vrstev vytvořených uhlíkovou pastou se odpory pohybovaly v řádu k Ω a byl tedy pro jejich měření dostačující multimetr.

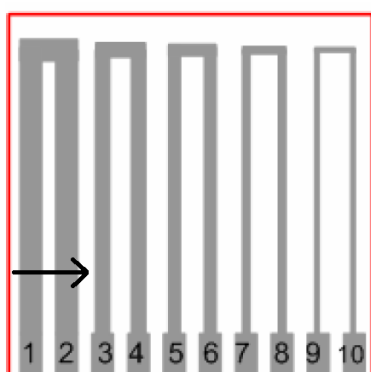
Multimetr HP 34401A byl vybaven jehlovými sondami s odporem 300 m Ω a tuto hodnotu tedy bylo nutné naměřené hodnoty kompenzovat. V případě měření odporových vrstev v řádu k Ω se samozřejmě nejedná o velkou chybu, ale z důvodu zachování konzistence výsledků byly naměřené hodnoty kompenzovány u každého měření multimetrem. Udávaná nepřesnost tohoto přístroje byla pro hodnoty >100 $\Omega \pm 0.01$ %. Pro

nižší odpory výrobce přesnost neuvádí a taková měření byla tedy zpravidla prováděna miliohmmetrem.

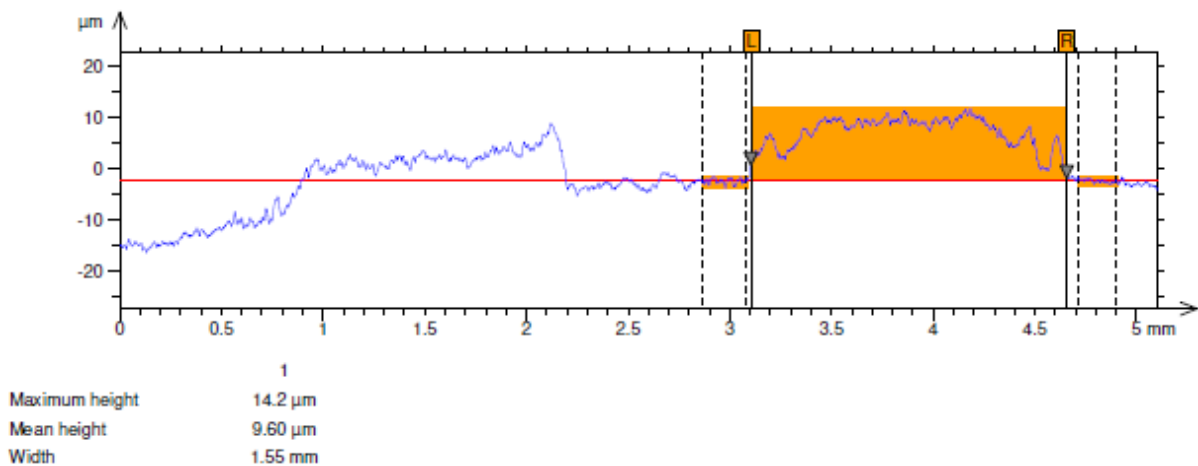
Měření pomocí miliohmmetru HP 4338B bylo prováděno přes kontaktní sondy s proudovou a napěťovou částí principem čtyřbodové metody. Přístroj umožňoval kompenzovat odpor těchto sond a nebylo tedy nutné odečítat od výsledných hodnot jejich odpor. V používaném rozsahu přístroj pracoval s proudem $100\ \mu\text{A}$ a přesností $\pm 0,4\ \%$.

3.3.3 Měření tloušťky vrstvy

Tloušťka vrstev byla měřena laboratorním drsnoměrem Form Tylsurf Intra od firmy Taylor Hobson. Udávaná nepřesnost měření s použitou sondou je $\pm 3\ \text{nm}$. Tloušťka vrstvy byla měřena po celé její šíři, jak je znázorněno na obr. 16 a takto získaná data byla následně pomocí programu TalyProfile Gold převedena na průměrnou tloušťku měřené vrstvy a její reálnou šířku. V tomto programu byly vždy zvoleny dva úseky okolo vrstvy jako reference pro výpočet tloušťky vrstvy. Příklad analýzy dat je vidět na obr. 17.



Obr. 17: Znázornění směru měření tloušťky vrstvy [4]



Obr. 18: Analýza dat získaných měřením na drsnoměru

Z obr. 14 je vidět mnoho zajímavých skutečností vyplývajících z takto získaných hodnot. Je například vidět, že vrstva může být značně členitá a povrch takové vrstvy je mnohem větší, než by se z naměřené hodnoty zdálo. Také naměřená šířka vrstvy se mírně liší od předpokladu, který je v tomto případě 1,5 mm. Z toho také plynou důsledky pro samotný výpočet odporu na čtverec. Detailněji bude vliv těchto zjištění probrán v kapitole 3.4.3.

3.4 Vyhodnocení výsledků

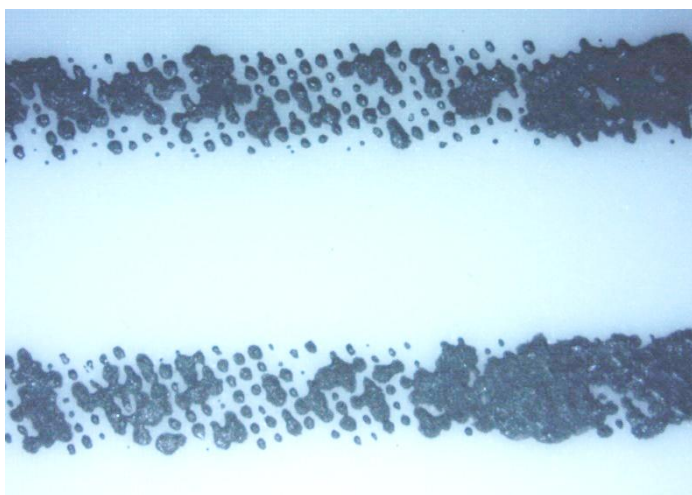
Měřenými parametry byl odpor výsledné vrstvy, její tloušťka a reálná šířka. Z těchto hodnot jsem poté počítal hodnotu odporu na čtverec a její závislosti na rozměrech vrstvy. U vzorků z pasty Paron 350 je také rozebráno jejich chování, protože tyto vzorky vykázaly nečekané a velmi zajímavé výsledky.

3.4.1 Posouzení vzorku po tisku

Po vypálení vzorků bylo k měření připraveno celkem 540 vodivých stříbrných cest a 180 odporových cest z uhlíku na 144 podložkách z korundové keramiky. Některé z těchto cest však měly vady jako je např. přerušená cesta, nebo na určitých místech nechtěné zúžení, nebo rozšíření vrstvy. Tyto vady vznikly z velké části už při tisku a některé při vypékání vrstvy. Bylo tedy nutné před samotným měřením vizuálně vrstvy posoudit a vyřadit z něj cesty, které by byly neměřitelné, nebo by měření zkreslily.

Po této kontrole bylo rovnou vyraženo 190 cest a zbylých 530 cest jsem podrobil měření odporů. Mezi nejčastější vady patřilo nerovnoměrné rozlití pasty mimo motiv, čímž se nedala určit šířka takové cesty a neslití pasty z důvodu ucpaných otvorů v sítu, nebo nedostatečného množství pasty. Následující obrázky zobrazují nejčastější druhy těchto vad.

Na obr. 18 je vidět, že na podložku nebylo přeneseno dostatečné množství pasty a ta se pro svou viskozitu neslila. Cesta má tedy v některých místech strukturu ostrůvků.



Obr. 19: Neslitá pasta

Obr. 19 ukazuje vrstvu, která se v určitých místech neslila vlivem špatně zvoleného odtrhu. To znamená špatně zvolený poměr mezi vzdáleností síta od podložky a tlaku na těrku.



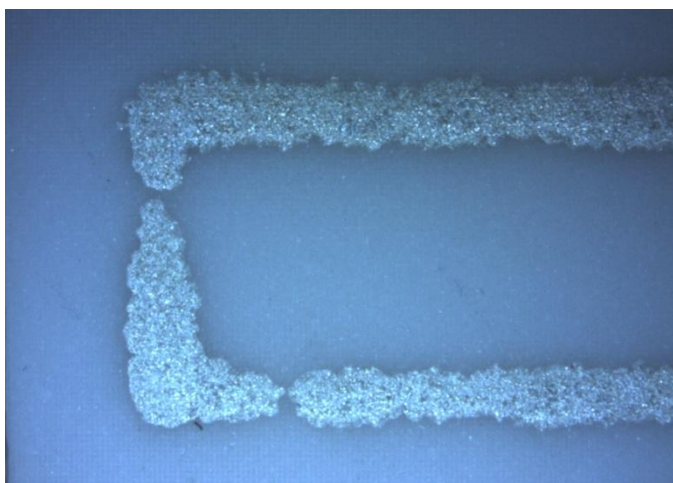
Obr. 20: Vliv odtrhu na strukturu vrstvy

V pravém horním rohu obr. 20 je vidět pasta která se vylila z tištěného vzoru. Taková cesta je sice měřitelná, ale nelze určit její odpor na čtverec. V extrémním případě může dokonce dojít i ke slítí a tím vodivému spojení dvou sousedících cest.



Obr. 21: Pasta rozlitá mimo požadovaný vzor

Na obr. 21 je vidět přerušení cesty způsobené ucpáním některých ok v sítu, oka mohla být ucpaná již před nanášením vrstvy z důvodu špatného očištění síta před použitím.



Obr. 22: Cesta přerušena vlivem ucpání ok

Jak už bylo řečeno 190 vrstev, tedy 26,4 %, bylo z měření rovnou vyřazeno vizuální kontrolou. Jde o relativně velké procento z celkového počtu vrstev a v případě sériové výroby součástek tvořených tlustovrstvou technologií a zejména v případě tisku více vrstev na jednu podložku by jistě šlo o velký problém. Je si však třeba uvědomit, že vybavení použité pro tuto práci bylo daleko od ideálního stavu a použité postupy také

nemusely být vždy ideální. Lze tedy předpokládat, že v tomto směru dosažené výsledky nejsou vypovídající pro posouzení chybovosti ručního sítotisku při výrobě.

3.4.2 Vzorky z pasty Paron 350

Dokumentace výrobce uváděla u pasty Paron 350 hodnotu odporu na čtverec $2 \text{ m}\Omega$ při tloušťce vrstvy $25,4 \text{ }\mu\text{m}$. Dalo se tedy očekávat, že hodnoty odporu naměřené na použitých motivech by při této tloušťce byly v řádu setin až desetin Ω . Po změření odporů v sadě A se však ukázalo, že odpory se pohybují v řádu desítek $\text{M}\Omega$ a rozhodně tyto vrstvy tedy nelze považovat za vodivé s velmi nízkou rezistivitou, jak uváděl výrobce pasty.

Vyvstala tedy otázka, proč nemají vrstvy tvořené touto pastou požadované vlastnosti. Kontrola data výroby ukázala, že tato pasta byla stará dva roky a výrobcem udávaná trvanlivost byla pouze půl roku. Vzorky byly tedy původně z práce vyloučeny jako nepoužitelné z důvodu prošlé pasty.

Situace se však změnila při náhodném vystavení jednoho ze vzorků této pasty slané vodě, tento vzorek se totiž náhle stal velmi dobře vodivým, jak je vidět v tab. 2. Na něm naměřené odpory se skokově zmenšily o sedm řádů na hodnoty okolo $1 \text{ }\Omega$. Při prvním pokusu tuto změnu reprodukovat byla použita běžná kohoutková voda a k žádné změně nedošlo. Bylo tedy zjevné, že důvodem změny byla zatím neznámá reakce soli a vytvrzené pasty.

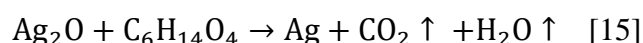
Paron 350 B11		
	bez soli	5 min v slané vodě
cesta	R (Ω)	R (Ω)
1	$1,04 \cdot 10^6$	0,25
2	$2,14 \cdot 10^6$	0,17
3	$5,05 \cdot 10^6$	0,71
4	$13,02 \cdot 10^6$	1,34
5	$55,40 \cdot 10^6$	1,70

Tab. 2: Změna po vystavení slané vodě

Další nově vzniklou otázkou tedy bylo, proč tyto vzorky takto reagovaly právě se solí. Výrobce bohužel v rámci ochrany svého know-how neuvádí, kromě tvrzení že jde o stříbrnou pastu, žádné informace o složení a jeho přesné zjištění bylo mimo možnosti

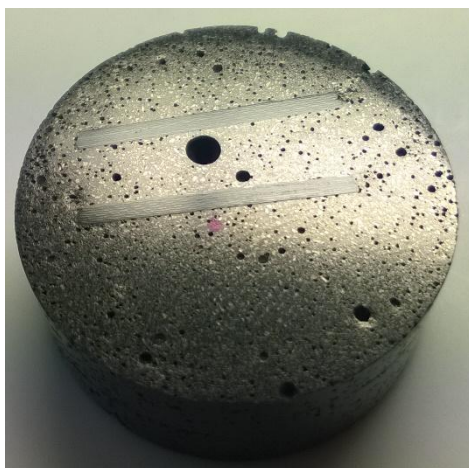
dostupných přístrojů. Pro pochopení této reakce tedy bylo potřeba hledat obecnější informace o tomto druhu past.

Jak se ukázalo ze zdrojů [3] [15] [16] obecně se tento druh past skládá ze stříbra ve formě sloučeniny (např. Ag_2O , AgNO_3) v kombinaci s různými organickými sloučeninami (např. $(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$, $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_4$), které spolu při teplotách okolo $150\text{ }^\circ\text{C}$ reagují, a výsledkem je vrstva tvořená částicemi stříbra s průměrem v řádu desítek nm. Jednou z uváděných možností byla tato reakce:



V použité pastě však k tomuto druhu reakce zjevně nedošlo, a proto také nevznikly žádné volné nano-částičky, které by vedly proud. Tato obecná znalost možných složení však stačila k pochopení základního principu této reakce, kdy slaná voda obsahující volné ionty sodíku a chloru reagovala se sloučeninou obsaženou v pastě a po této reakci zbylo na korundové podložce stříbro a vzniklé sloučeniny sodíku a chloru se rozpustily ve vodě.

Tento předpoklad dále podporuje měření na elektronovém mikroskopu Phenom, kde byla na jednom pro tento účel speciálně vytvořeném řezu vzorkem (obr. 22) provedena prvková analýza v místech vystavených i nevystavených slané vodě.

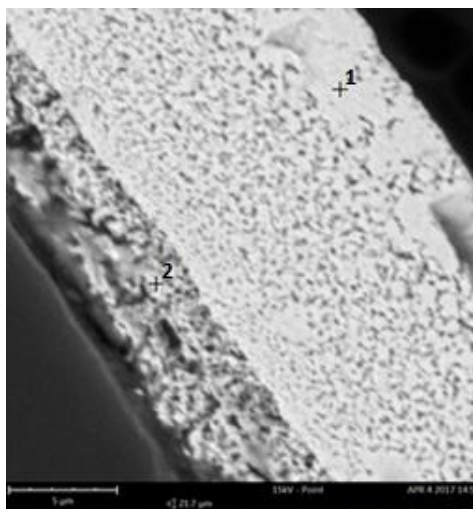


Obr. 23: Vzorek použitý pro prvkovou analýzu

Tento vzorek byl před zalitím do podoby vhodné pro elektronový mikroskop ve slaném roztoku po dobu 30 minut. Z hlediska elektrických vlastností byl rozdíl mezi pěti a třiceti minutami ve slané vodě zanedbatelný, ale v případě vystavení slané vodě po dobu delší než 30 minut docházelo k degradaci ve formě koroze a částečného, nebo úplného

odlepení natištěné vrstvy od podložky. To zapříčinilo zhoršení elektrických vlastností a vystavení slané vodě po dobu delší než 30 minut se tedy jeví jako nežádoucí.

Následující obr. 23 ukazuje detail na zmiňovaný řez vzorkem. Světlejší část o tloušťce přibližně 13 μm zreagovala se slanou vodou, do tmavší části vrstvy reakce nepronikla. Jak už bylo řečeno, prvková analýza provedená na elektronovém mikroskopu ukázala, že původní sloučenina obsažená v pastě byla oxid stříbrný a po reakci se slanou vodou ve vrstvě zbylo čisté stříbro. Zjištěné koncentrace jednotlivých prvků v měřených bodech ukazuje tab. 3, detailní protokol z tohoto měření je v příloze 1. Detekovaný uhlík byl pravděpodobně součástí organické sloučeniny původně určené k reakci s oxidem stříbrným. Posledním očekávaným prvkem byl vodík. Výrobce použitého mikroskopu však uvádí, že z důvodu malé atomové hmotnosti přístroj nedokáže prvky jako vodík a helium rozpoznat. Proto se vodík na výsledcích prvkové analýzy neukázal.



Obr. 24: Vrstva vystavená soli v řezu

Bod měření 1		Bod měření 2	
Prvek	Hmotnostní procento	Prvek	Hmotnostní procento
C	19.15	C	18.23
Ag	80.85	O	16.49
		Ag	64.05

Tab. 3: Prvky obsažené ve vzorku pro prvkovou analýzu (obr. 23)

Díky zjištěním uvedeným v této kapitole byla jedna sada vzorků z pasty Paron 350 ponořena do slané vody po dobu 30 minut (sada C) a sada B byla po dobu 1 hodiny dále vytvrzována na 180 °C.

U sady B došlo k určitému zlepšení elektrických vlastností. Vzorky však byly vystaveny o 30 °C vyšší teplotě, než doporučuje výrobce a mohlo tedy dojít ke zhoršení některých vlastností, které nebyly měřeny. Sada C vykázala očekávané snížení odporu, které byly nejnižší ze všech měřených vzorků. Otázkou však zůstává, jak by na tom takto vytvořená vrstva byla z hlediska mechanických vlastností, a to zejména životnosti.

3.4.3 Vyhodnocení naměřených hodnot

Postupy použité při tvorbě vzorků a měření byly zpracovány v předcházejících kapitolách. Tato část se bude zabývat samotným vyhodnocením naměřených hodnot. Z důvodu velkého množství dat se budou veškeré hodnoty ve formě tabulek nacházet v příloze 2 a v této kapitole budou pouze z nich vycházející grafy. Několik málo naměřených hodnot, které příliš vybočovaly z trendu daného většinou ostatních měření (např. vlivem skrytých vad, které se nepodařilo odhalit vizuálně před samotným měřením), byly z příložených grafů odebrány. Jednotlivých bodů tvořících grafy bylo mnoho, a proto byly z důvodu přehlednosti odstraněny.

Většinu této kapitoly tvoří porovnání závislosti naměřených odporů s jednotlivými rozměry vytvořených vrstev a před samotným vyhodnocením položíme několik obecných předpokladů:

- $R = \frac{\rho \times l}{w \times h}$ kde R je naměřený odpor, l je délka, w je šířka, h je tloušťka vrstvy a ρ je rezistivita.

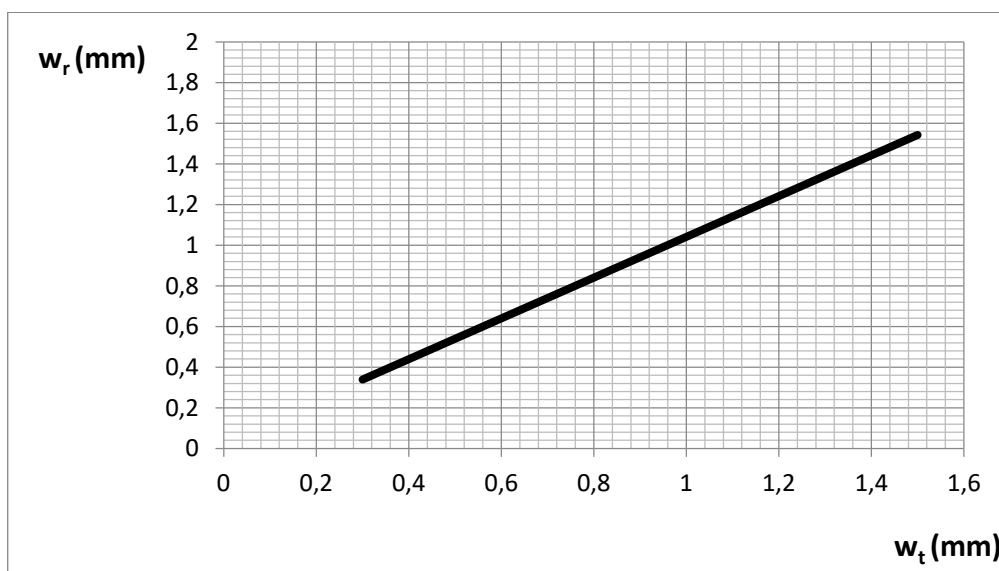
Naměřený odpor by tedy měl s rostoucí délkou stoupat a s rostoucí šířkou a tloušťkou vrstvy klesat.

- $R_{\square} = R \times \frac{w}{l} = \frac{\rho \times l}{w \times h} \times \frac{w}{l} = \frac{\rho}{h}$ kde R_{\square} je odpor na čtverec.

Odpor na čtverec by tedy neměl být závislý na délce ani šířce vrstvy, ale pouze na její tloušťce a rezistivitě. S rostoucí tloušťkou vrstvy by měl odpor na čtverec klesat.

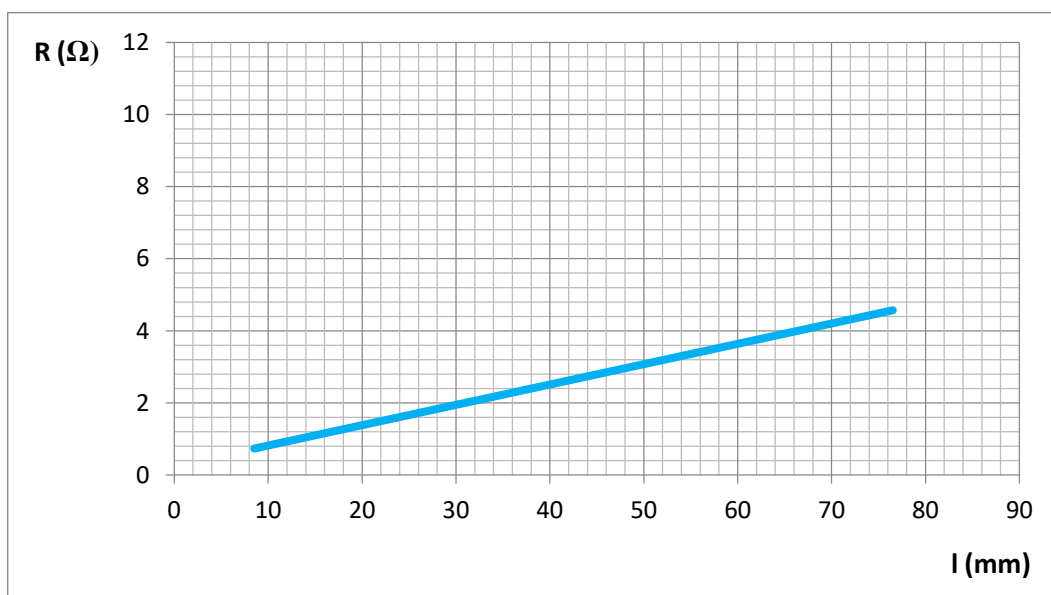
- Tlustá vrstva má nehomogenní strukturu, a to může určitým způsobem ovlivnit všechny výše zmíněné parametry včetně rezistivity.

Měření šířky vytvořených vrstev ukázalo, že pokud budeme počítat s teoretickou šířkou dle parametrů použitého síta, vnese to do výsledků značnou chybu. Nanesené vrstvy byly totiž průměrně kolem 10 % širší než teoretické hodnoty, jak dokumentuje následující graf, kde w_r je naměřená (reálná) šířka a w_t je zadaná (teoretická) šířka.

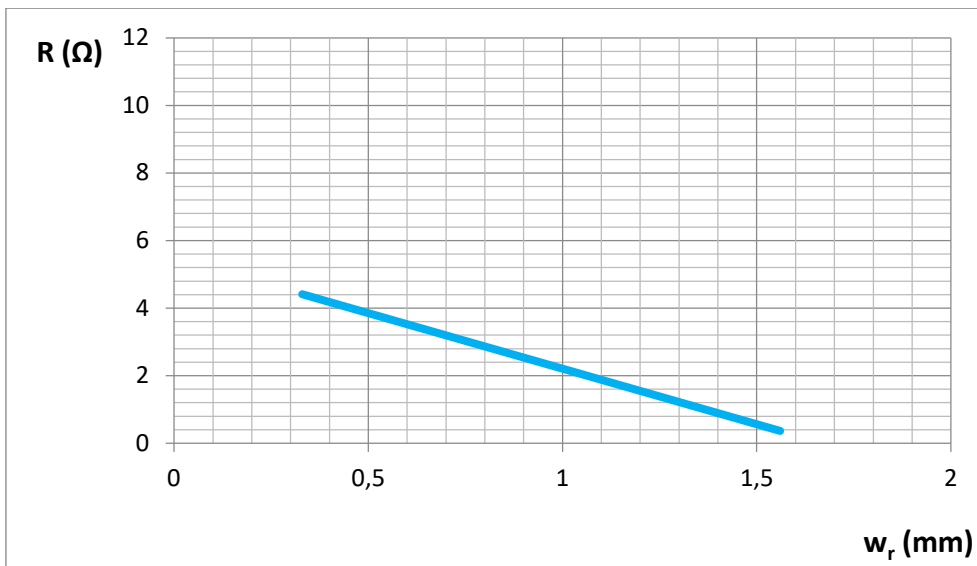


Graf 1: Porovnání teoretických a naměřených šířek vrstev pro všechny pasty.

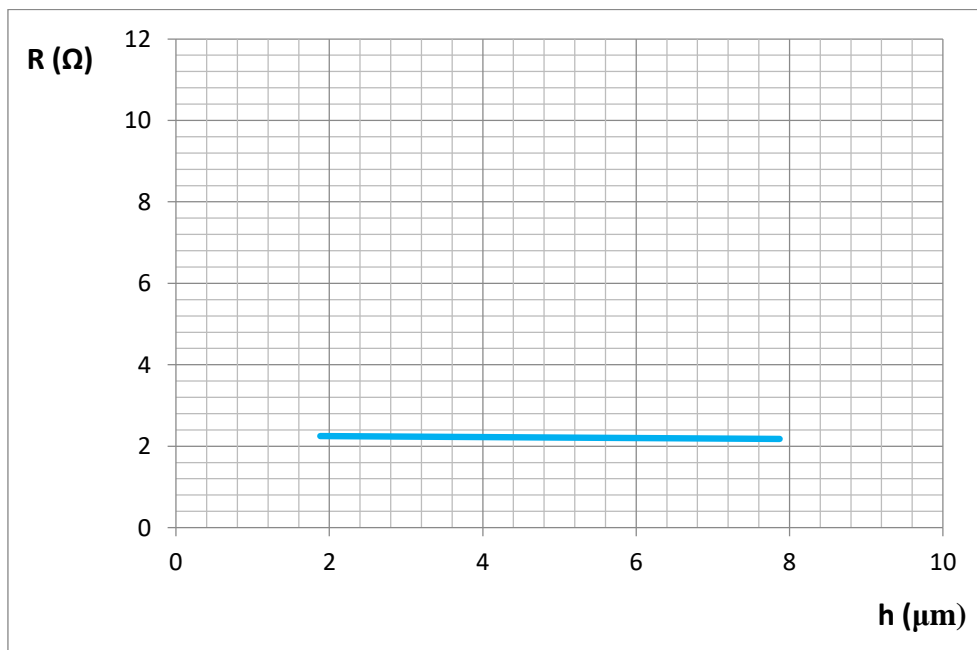
První vyslovený předpoklad, že naměřený odpor by měl s rostoucí délkou stoupat a s rostoucí šířkou a tloušťkou vrstvy klesat, byl konfrontován s měřením na vzorcích z pasty Paron 910, jak znázorňují grafy 2, 3 a 4.



Graf 2: Paron 910 - Závislost naměřeného odporu na délce tlusté vrstvy.



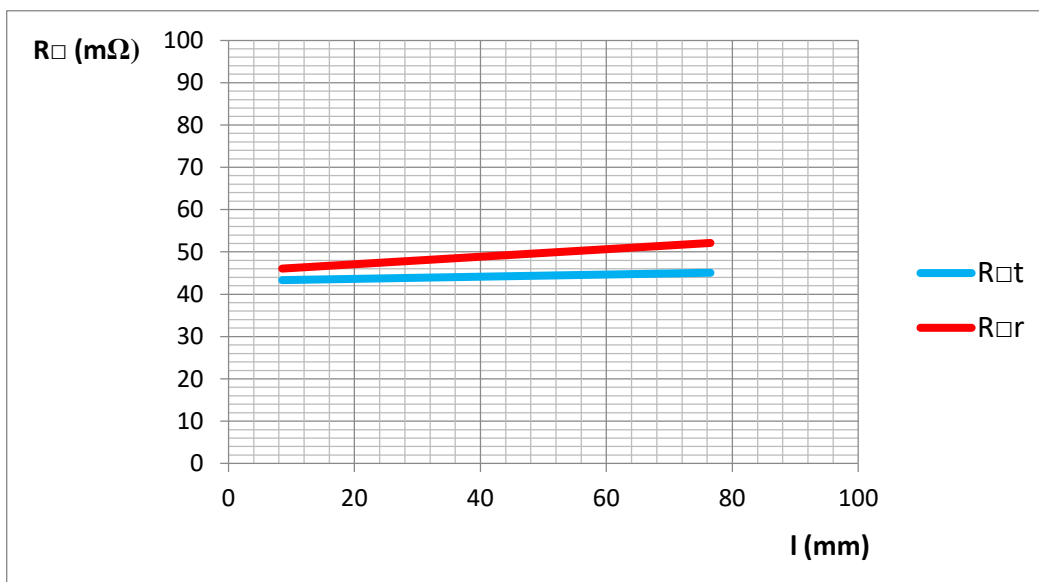
Graf 3: Paron 910 - Závislost naměřeného odporu na reálné šířce tlusté vrstvy.



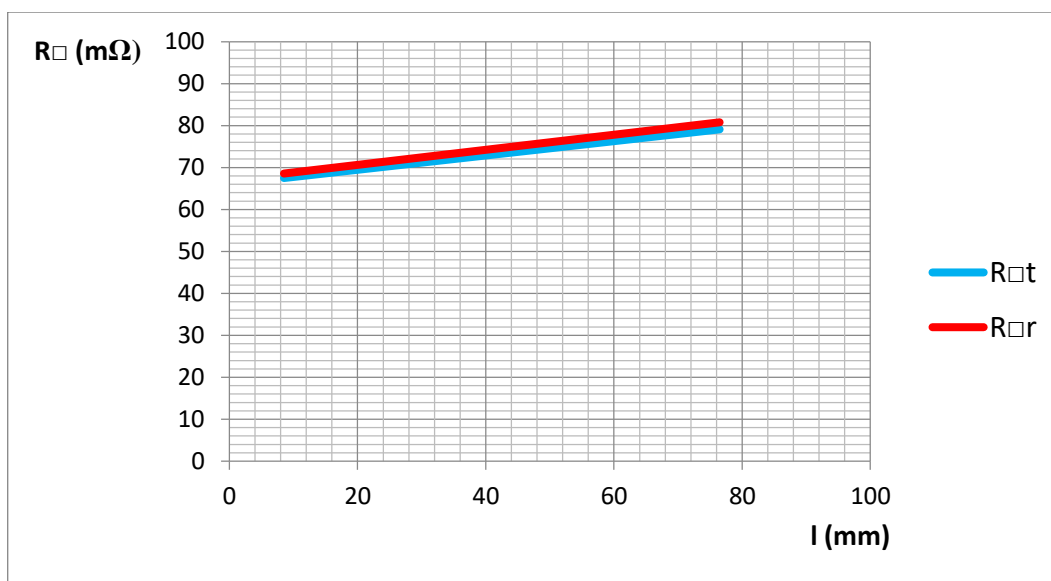
Graf 4: Paron 910 - Závislost naměřeného odporu na tloušťce tlusté vrstvy.

Z těchto grafů je vidět, že odpor opravdu roste s délkou vrstvy a klesá s její šířkou. Sklon těchto grafů byl pravděpodobně ovlivněn již zmíněnou nehomogenní strukturou. Zajímavý je graf č. 4, znázorňující závislost odporu na tloušťce vrstvy. Z něj vyplývá, že odpor se s tloušťkou prakticky nemění. Důvodem pravděpodobně je, jak už bylo zmíněno v kapitole 3.3.3, že povrch vytvořené vrstvy má relativně velkou drsnost povrchu, což jak se zdá zvyšuje odpor.

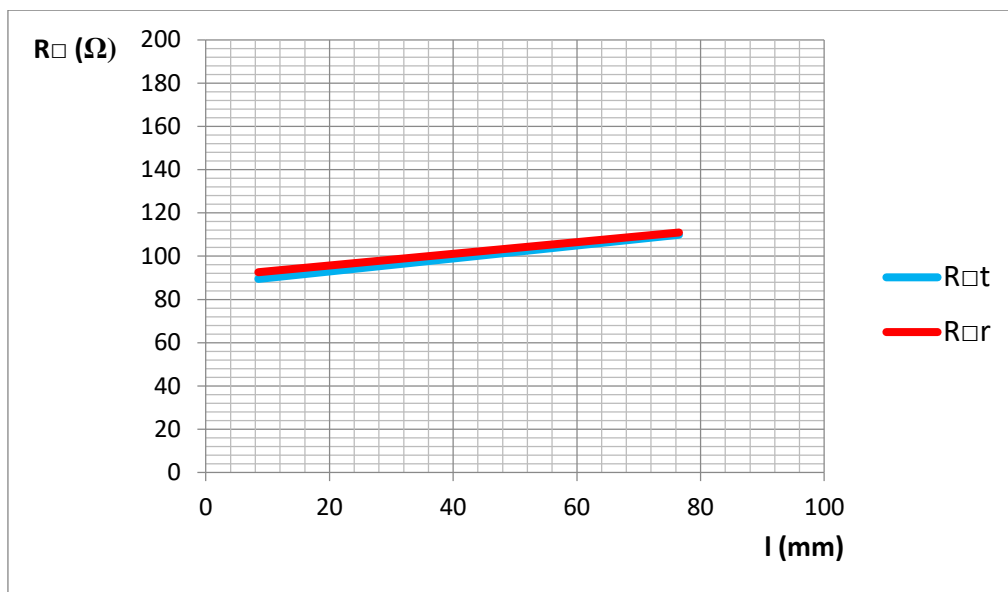
Další porovnání mapuje vliv délky tlusté vrstvy na její odpor na čtverec. Grafy pro pasty Paron 910, 920 a CSP 3110D zobrazují průběhy odporů vypočtených z teoretických ($R_{\square t}$) a změřených šířek ($R_{\square r}$) a graf pro pastu Paron 350 znázorňuje průběh sady B (vypálení na 180 °C po dobu 1 hodiny) a sady C (30 minut ve slané vodě).



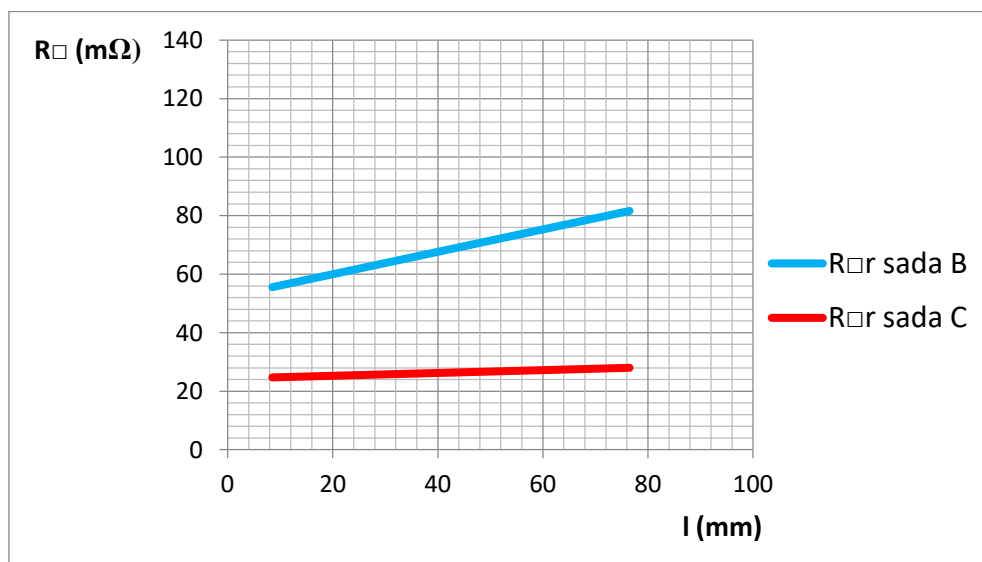
Graf 5: Paron 910 – Závislost odporu na čtverec na délce vrstvy



Graf 6: CSP 3110D – Závislost odporu na čtverec na délce vrstvy



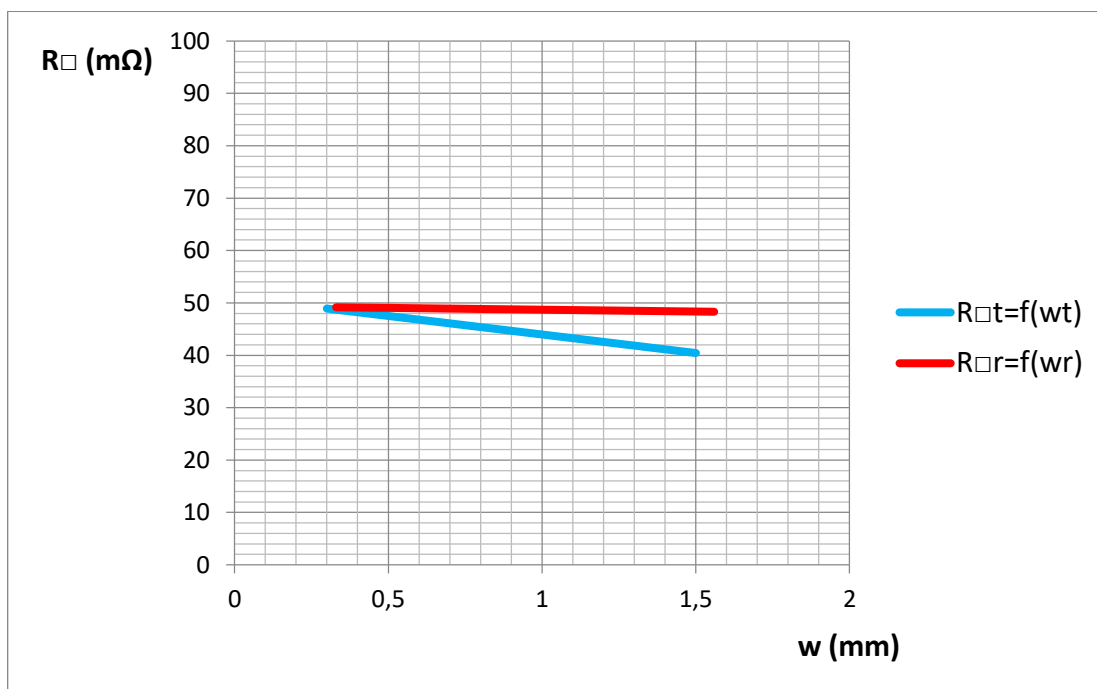
Graf 7: Paron 920 – Závislost odporu na čtverec na délce vrstvy



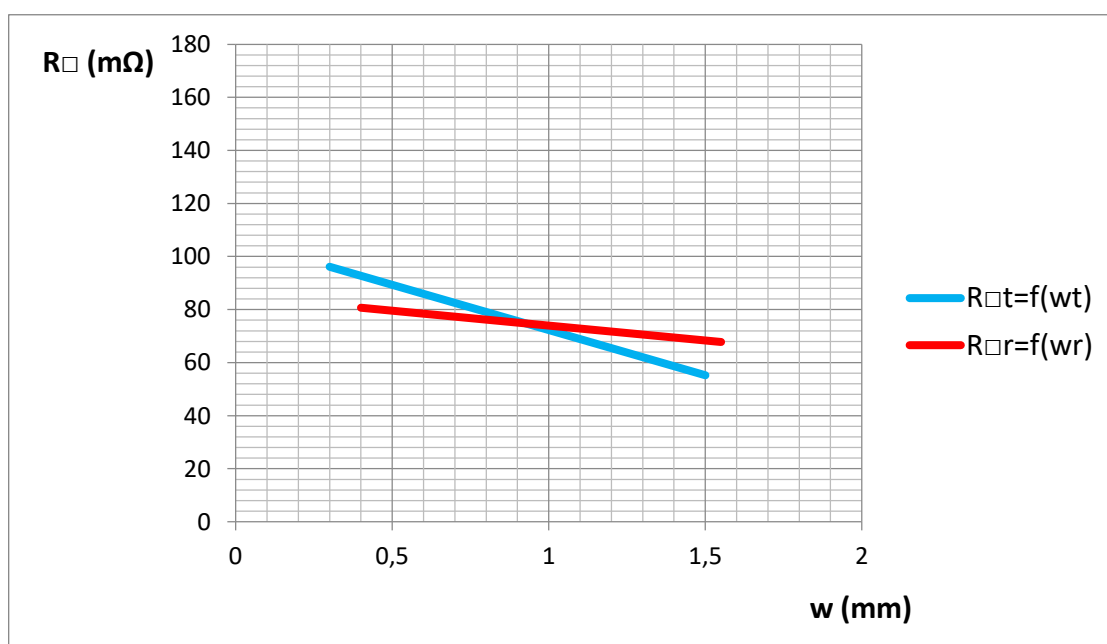
Graf 8: Paron 350 – Závislost odporu na čtverec na délce vrstvy

První zřejmá věc z grafů je, že hodnoty pro odpory na čtverec vypočtené z naměřené šířky vrstvy mají vyšší hodnotu než ty vypočtené z teoretických rozměrů. To je dáno právě naměřenou šířkou vrstvy, která je, jak už bylo zmíněno, v průměru vyšší než hodnota teoretická. Hodnoty odporů na čtverec s délkou vrstvy rostou, což je pravděpodobně zapříčiněno vyšším množstvím hůře vedoucích míst v nehomogenní struktuře. Různý sklon některých průběhů je poté způsoben různými rozdíly mezi teoretickými a naměřenými šířkami. Graf pro Paron 350 jasně ukazuje, že vzorky vyvinuté ve slané vodě mají nižší rezistivitu, než sada B a ze sklonu jejich křivky lze také usoudit, že jsou méně nehomogenní.

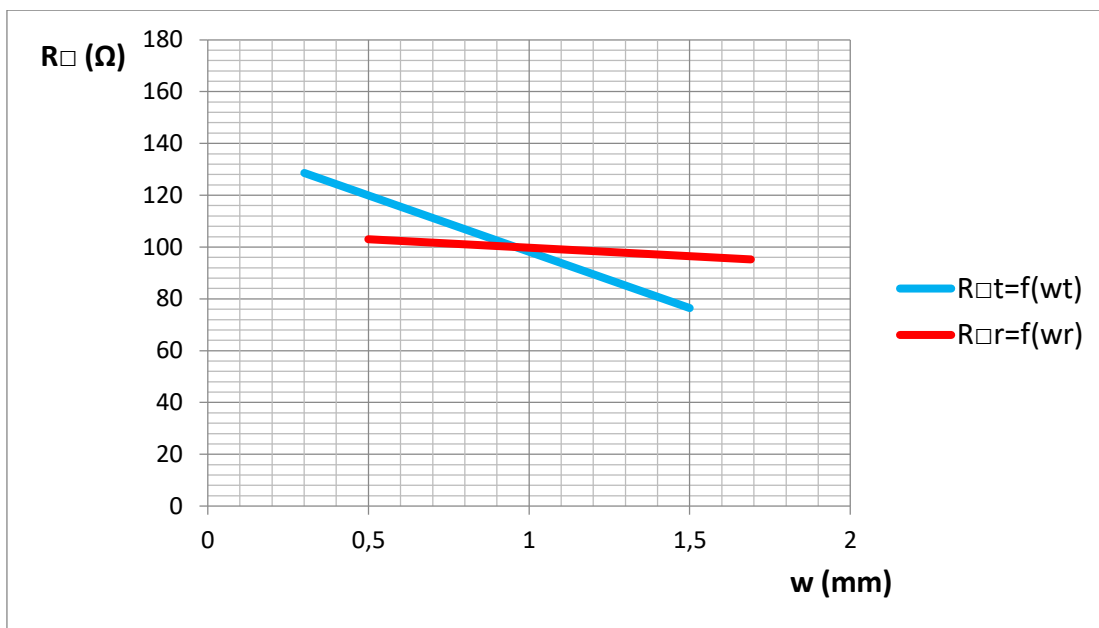
Následující grafy sledují závislost odporu na čtverec na šířce vrstvy. První tři pasty opět porovnávají reálné údaje odporů na čtverec ($R_{\square r}$) vzhledem ke změřené šířce vrstvy (w_r) a odpory na čtverec vycházející z teoretické šířky vrstvy ($R_{\square t}$) v závislosti na této šířce (w_t). Graf ke vzorkům pasty Paron 350 opět porovnává hodnoty sad B a C vzhledem ke změřené šířce vrstvy.



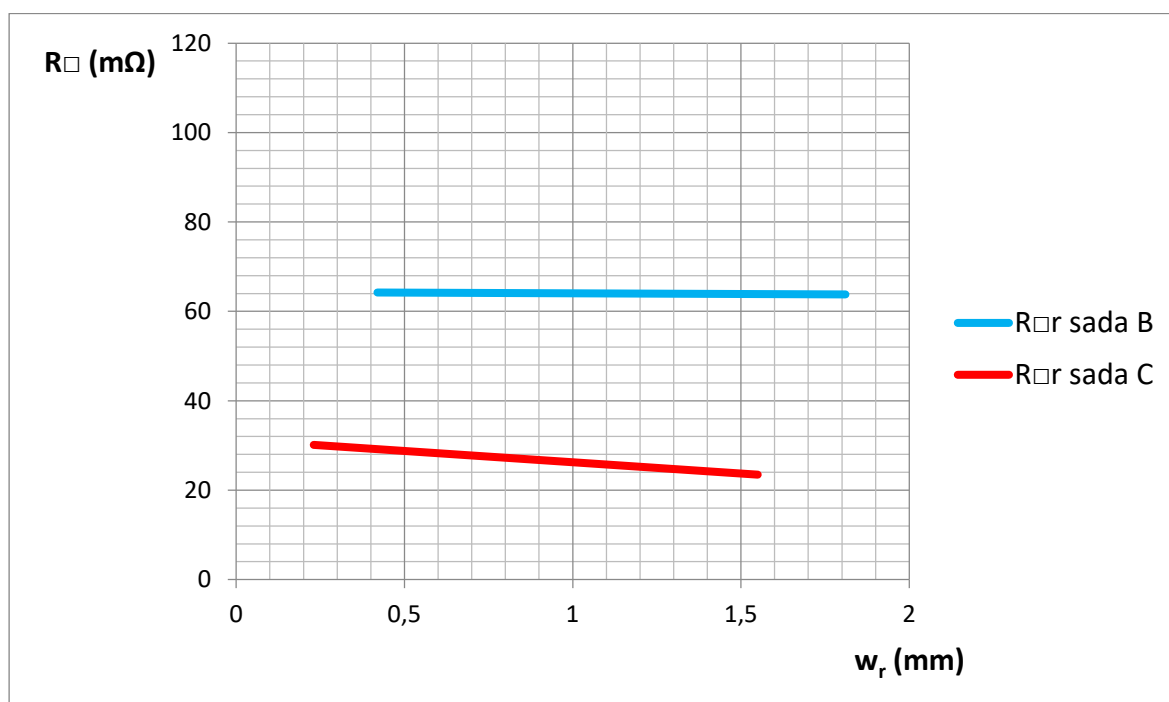
Graf 9: Paron 910– Závislost odporu na čtverec na šířce vrstvy



Graf 10: CSP 3110D– Závislost odporu na čtverec na šířce vrstvy



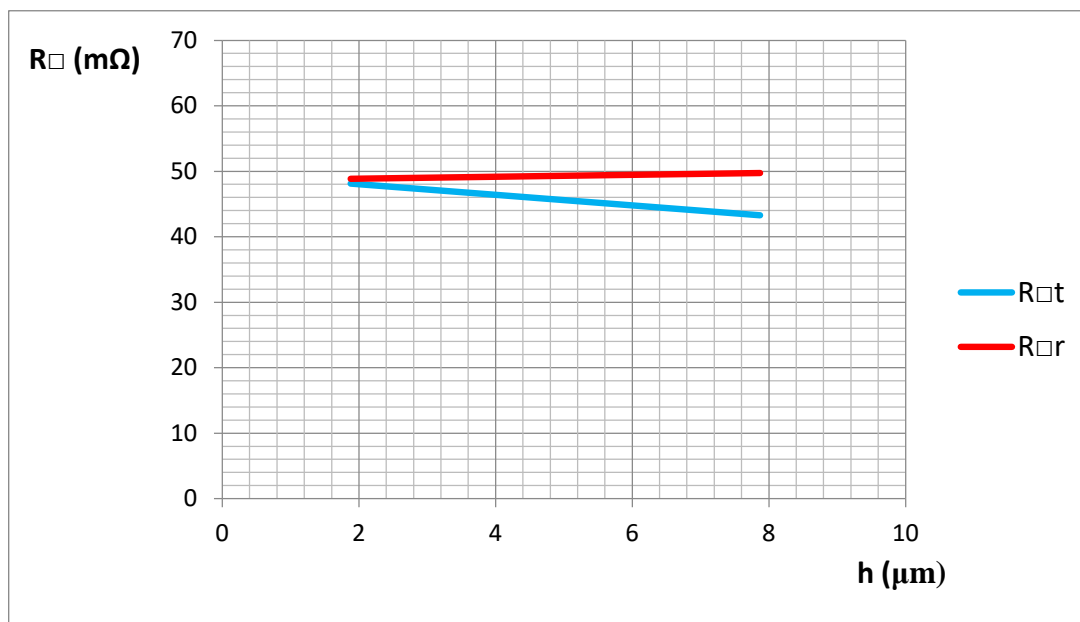
Graf 11: Paron 920– Závislost odporu na čtverec na šířce vrstvy



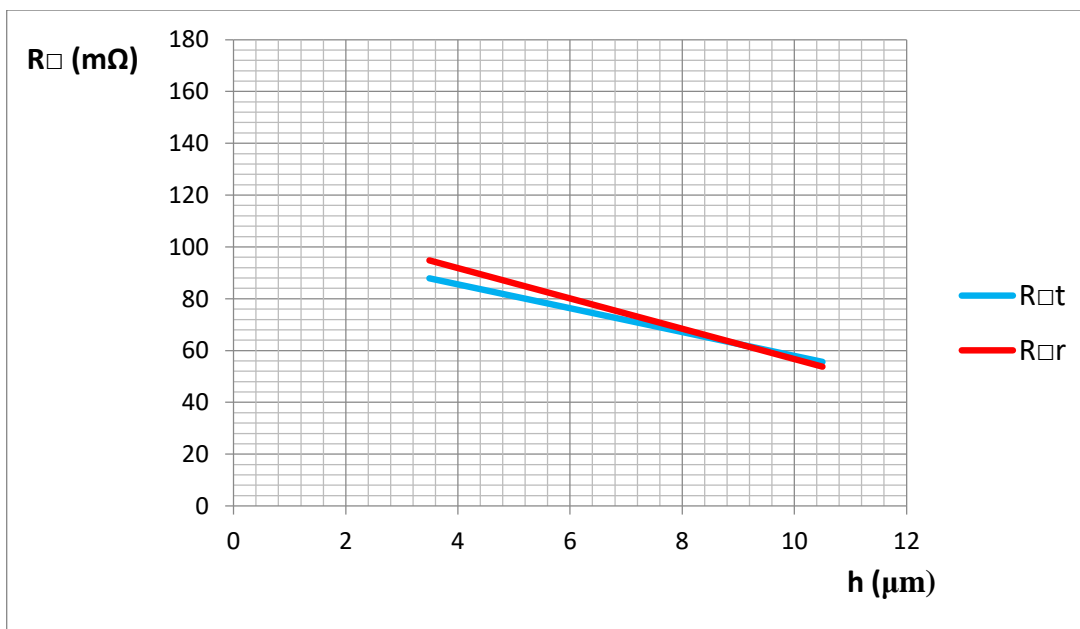
Graf 12: Paron 350– Závislost odporu na čtverec na šířce vrstvy

Na grafech je vidět, že odpor na čtverec s rostoucí šířkou vrstvy klesá. To je pravděpodobně způsobeno tím, že v širší vrstvě se místa s nižší vodivostí projeví méně často než u vrstev užších. Z prvních tří grafů je dále vidět, že pokud bychom počítali s teoretickou šířkou vrstvy, tak budeme pro menší šířky očekávat hodnoty vyšší než skutečné, a naopak u širokých vrstev budou reálné hodnoty vyšší než očekávané. Sada B pasty Paron 350 opět ukázala nejpříznivější závislost hodnot.

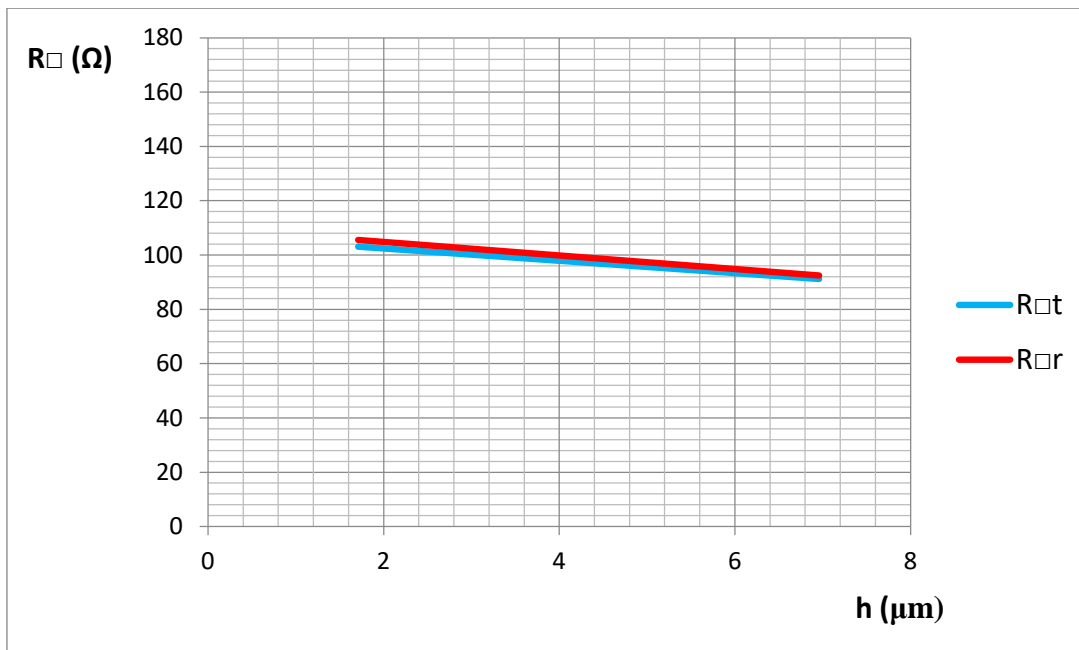
Poslední zkoumanou charakteristikou je odpor na čtverec v závislosti na tloušťce vrstvy. První tři grafy znázorňují naměřenou závislost teoretického ($R_{\square t}$) a reálného ($R_{\square r}$) odporu na čtverec vzhledem k naměřené průměrné tloušťce vrstvy a graf pro pastu Paron 350 vyjadřuje závislosti pro sady B a C.



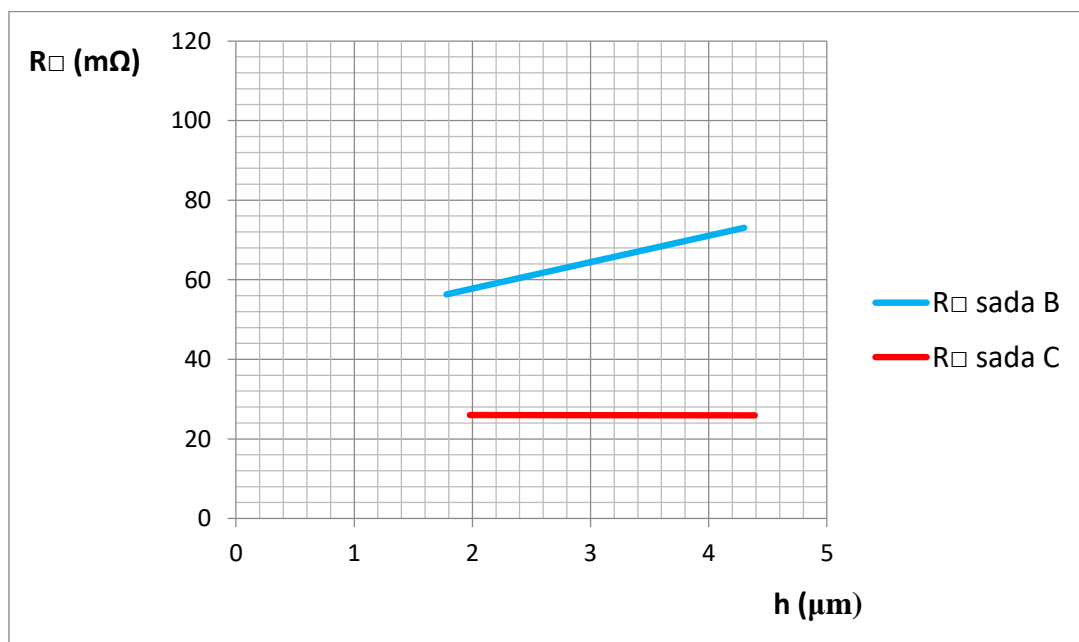
Graf 13: Paron 910– Závislost odporu na čtverec na tloušťce vrstvy



Graf 14: CSP 3110D– Závislost odporu na čtverec na tloušťce vrstvy



Graf 15: Paron 920– Závislost odporu na čtverec na tloušťce vrstvy



Graf 16: Paron 350– Závislost odporu na čtverec na tloušťce vrstvy

Vyvodit z těchto grafů rozumné výsledky je těžší než v předcházejících případech. I když se ve většině grafů potvrdil předpoklad, že odpor na čtverec bude s rostoucí tloušťkou vrstvy klesat, tak některé charakteristiky rostou. Možným vysvětlením je, že u nich převládá vliv nehomogenity, nebo drsnosti jejich povrchu. Důvodem však může být také způsob měření tloušťky vrstev, kdy v případě velké drsnosti povrchu není prosté průměrování tloušťky ideální řešení.

Závěr

Cílem první části této práce bylo obecně rozebrat základní vlastnosti tlustých vrstev, technologie jejich výroby, používané materiály a využití tlustých vrstev v dnešních aplikacích, aby si čtenář vytvořil alespoň základní představu o této technologii.

V druhé polovině práce, zabývající se samotnou tvorbou měřitelných vzorků, byl popsán postup přípravy vodivých a odporových tlustých vrstev na podložky z korundové keramiky za pomoci sítotiskové technologie. Na těchto vzorcích bylo následně provedeno měření odporu, šířky a tloušťky jednotlivých vrstev a tato měření byla použita pro zkoumání vlivu rozměrů vrstev na jejich odpory.

Zjištěné souvislosti byly prezentovány ve formě grafů charakterizujících závislosti odporu na délce, šířce a tloušťce vytvořených vrstev. Jeden z rozebíraných výsledků je také nezanedbatelný vliv rozdílu mezi teoretickou a reálnou šířkou vrstvy. Jak se ukázalo, v případě výpočtů s teoretickou šířkou se vytvoří znatelná odchylka od reálných hodnot. Z měření vyplývající trendy mohly být v některých případech částečně ovlivněny parametry, jako je hrubost povrchu vytvořených vrstev. Právě ta má pravděpodobně nezanedbatelný vliv na velikost výsledného odporu, avšak přesnou souvislost mezi nimi se nepodařilo uspokojivě zdokumentovat. Na druhou stranu to otevírá prostor pro možná další měření navazující na tuto práci.

Další otázka, která vznikla během samotného měření natištěných vzorků, se týkala pasty Paron 350 ta, jak se ukázalo, pracuje na principu reakce oxidu stříbrného s organickou sloučeninou a vytváří vrstvu složenou z nanočástic stříbra. U vytvořených vzorků však, pravděpodobně stářím pasty, reakce neproběhla a výsledkem byla vrstva s velmi vysokou rezistivitou. Tyto vzorky se následně podařilo vlivem chemické reakce se slanou vodou uvést do funkčního stavu a výsledky takto vytvořené vrstvy byly bezkonkurenčně nejlepší ze všech použitých past. Toto zjištění by také bylo jistě možno detailněji rozebrat v navazující práci, protože i v tomto směru stále zůstává mnoho nezodpovězených otázek.

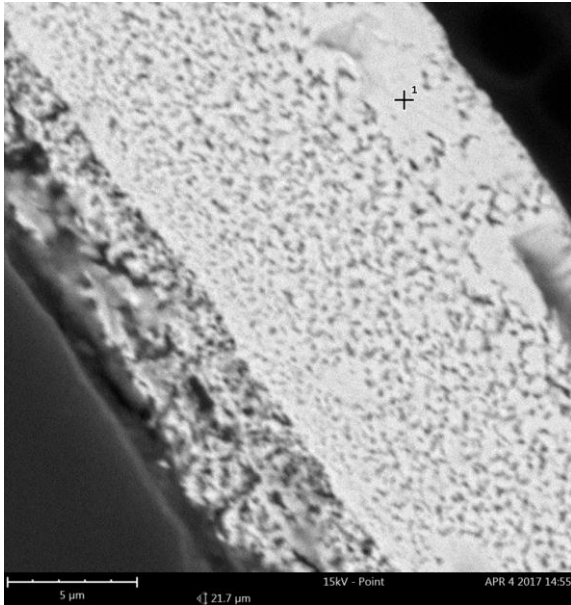
Seznam použitých zdrojů

- [1] SOUTOR, Zdeněk, Josef ŠAVEL a Jaroslav ŽŮREK. *Hybridní integrované obvody*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982.
- [2] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [3] ZARGAR, R. A., CHACKRABARTI, S., ARORA, M., HAFIZ, A. K.: Synthesis, characterization and interpretation of screen-printed nanocrystalline CdO thick film for optoelectronic applications, *International Nano Letters*, 06/2016, Ročník 6, Číslo 2
- [4] *Tlusté vrstvy – tisk, vytvrzení, měření* [online]. ČVUT FEL. Poslední změna: 8.2.2011 [cit. 1.5.2017]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/tlustvrsvy.pdf>
- [5] SZENDIUCH, Ivan. *Tlusté vrstvy* [online]. 2008 [cit. 1.5.2017]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a_tluste_vrstvy.pdf
- [6] Wei Guo, Zhi Zeng, Xiaoying Zhang, Peng Peng, and Shanping Tang, “Low-Temperature Sintering Bonding Using Silver Nanoparticle Paste for Electronics Packaging,” *Journal of Nanomaterials*, vol. 2015, Article ID 897142, 7 pages, 2015. doi:10.1155/2015/897142
- [7] *Thin and thick film* [online]. 3.1.2013 [cit. 2.5.2017]. Dostupné z: <http://www.resistorguide.com/thin-and-thick-film/>
- [8] ADÁMEK, Martin, Radimír VRBA, Jan JAROŠ, Edita HEJÁTKOVÁ a Jan PRÁŠEK. *Mikrosenzory a mikromechanické systémy* [online]. [cit. 2.5.2017]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/menufram.htm>
- [9] UNIPRINT. *pbt works* [online]. [cit. 15.5.2017]. Dostupný na WWW: <http://www.pbt.cz/detail/uniprint/24/?path=produkty/tisk-a-dispens/sitotiskova-zarizeni/#>
- [10] NAIR, K. M. *Advances in dielectric materials and electronic devices: proceedings of the 107th Annual Meeting of the American Ceramic Society : Baltimore, Maryland, USA (2005)*. Westerville, Ohio: American Ceramic Society, c2006. ISBN 1574982443.
- [11] Huiling Li, Xiaoyan Zang. *Study on the structure and proterties of thick-film capacitors fabricated by laser micro-cladding and rapid prototype*, *Journal of Materials Processing Technology*, 12.4.2007, Svazek 184, Článek 1-3
- [12] Lewis, A. *Noncontact Dispensing. STM*. 5/1999. GST 126813153
- [13] *Laser structuring of ITO Layers* [online]. LPKF Laser&Electronics. [cit. 15.5.2017]. Dostupné z: <http://www.lpkf.com/applications/lase-micromachining/ito-layer-structuring.htm>
- [14] Lorenz, P., Ehrhardt, M., Zimmer, K. *Laser Structuring of Thin Layers for Flexible Electronics by a Shock Wave-induced Delamination Process*. Physics Procedia. Elsevier. 2014.
- [15] Mu, F., Zhao, Z., Zou, G., Bai, H., Wu, A., Liu, L., . . . Zhou, Y. N. (2013). Mechanism of Low Temperature Sintering-Bonding through In-Situ Formation of Silver Nanoparticles Using Silver Oxide Microparticles. *Materials Transactions*, 54(6), 872-878. doi:10.2320/matertrans.md201231

- [16] Mu, F., Zhao, Z., Zou, G., Bai, H., Wu, A., Liu, L., . . . Zhou, Y. N. (2013). Mechanism of Low Temperature Sintering-Bonding through In-Situ Formation of Silver Nanoparticles Using Silver Oxide Microparticles. *Materials Transactions*, 54(6), 872-878. doi:10.2320/matertrans.md201231

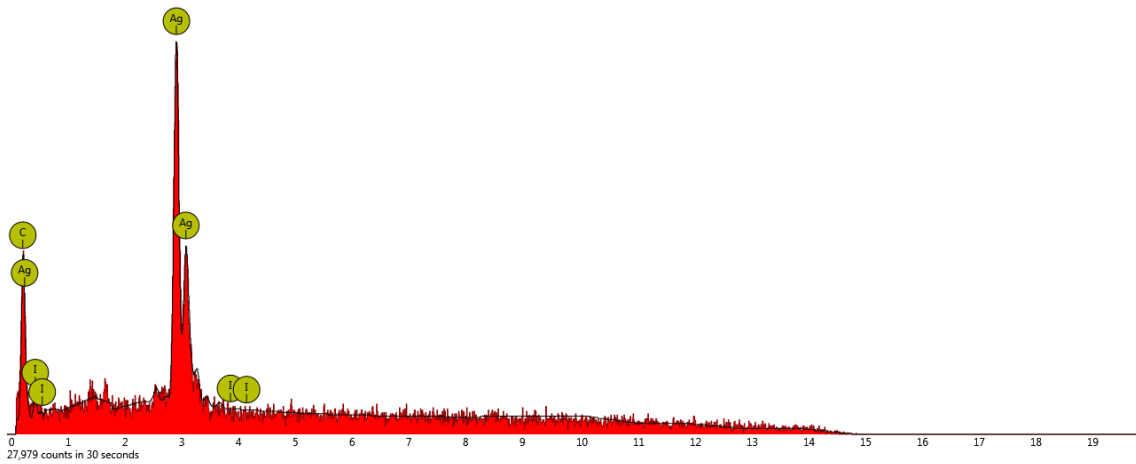
Příloha 1

1. spot



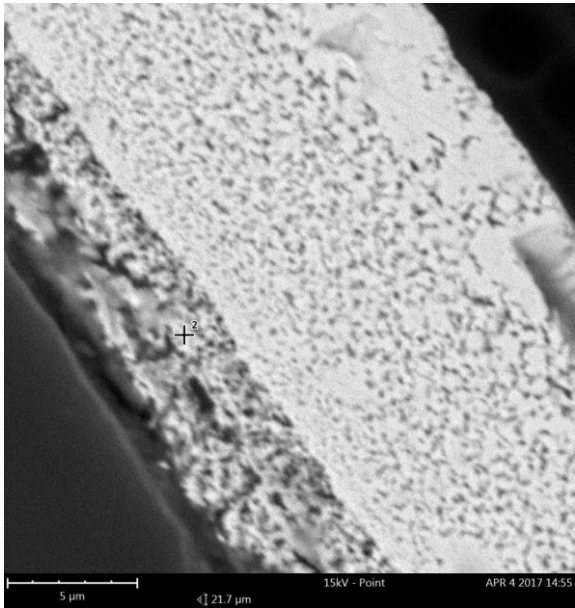
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. Conc.
C	68.03	19.15	C	68.03
Ag	31.97	80.85	Ag	31.97

FOV: 21.7 μm, Mode: 15kV - Point, Detector: BSD Full, Time: APR 4 2017 14:55



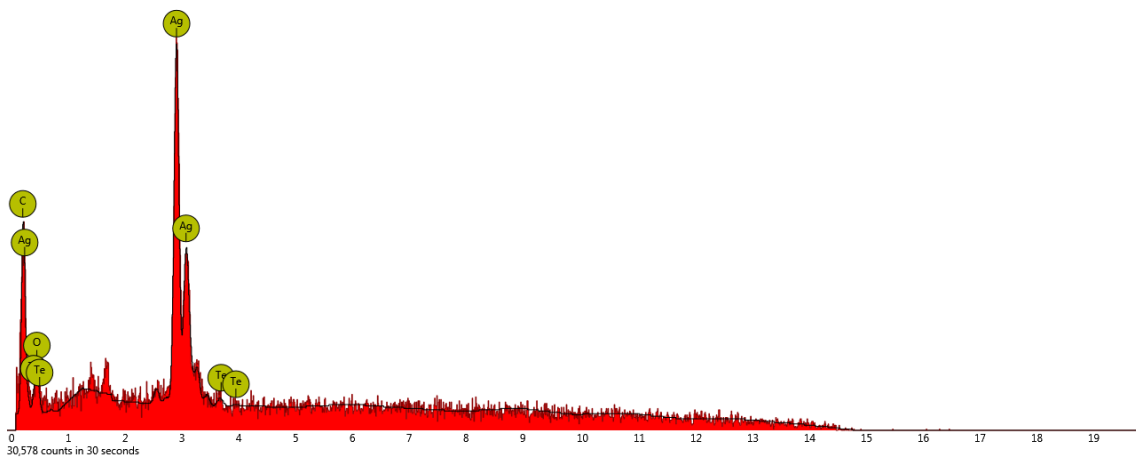
Disabled elements: B, Cu, Si

2. spot



Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. Conc.
C	48.16	18.23	C	71.56
O	32.70	16.49		
Ag	18.84	64.05	Ag	27.99

FOV: 21.7 μm, Mode: 15kV - Point, Detector: BSD Full, Time: APR 4 2017 14:55



Disabled elements: B, Cu, Si

Příloha 2

Nevyplněná místa značí neprovedené měření. Jednotlivé příčiny nebylo z důvodu množství dat možno specifikovat.

Paron 910 - R [Ω]						
cesta	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	1,966	1,851	2,643	4,184		0,314
2	2,660	2,760	1,866	2,849		
3	3,080	3,580	1,315	2,258		0,873
4	5,180	5,530	0,945	1,590		
5		11,230	0,475	0,813		1,785

Paron 910 - R [Ω]						
cesta	A7	A8	A9	A10	A11	A12
1		1,128		5,502	0,998	0,918
2		1,336	3,780	4,182		
3	1,276	1,552	2,857	3,264	3,656	3,151
4	2,322	2,133	1,765	2,098	6,975	6,457
5	8,363		0,865	0,919	9,250	8,180

Paron 910 - R [Ω]						
cesta	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1	1,320	1,294	2,027	2,567	0,495	0,272
2	2,149	1,870	1,814	1,781		
3	2,437	2,354	1,416	1,362	1,895	1,302
4	4,670	4,014	1,011	0,930	2,486	3,203
5	8,890	7,653	0,442	0,437	2,402	3,316

Paron 910 - R [Ω]						
cesta	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	0,951	1,250	3,033	2,870	0,650	0,481
2	1,558	1,680	2,399	2,311		
3	1,795	2,102	1,882	1,702	2,087	1,713
4	2,713	2,810	1,163	1,032	3,604	2,995
5	5,958		0,515	0,443	4,064	3,315

Paron 910 - R [Ω]						
cesta	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	1,328	1,370			0,273	0,278
2	2,004	2,050	2,026	1,917		
3	2,767	2,741	1,473	1,518		0,879
4	4,601	4,653	0,734	1,186		1,415
5	9,097	10,165	0,495	0,616	1,928	1,593

Paron 910 - R [Ω]						
cesta	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1	1,865	1,091	4,418	4,325	0,549	0,475
2	1,568	1,484	3,083	2,799		
3	1,593	1,858	2,196	1,992	2,126	1,895
4	3,072	3,045	1,460	1,265	3,857	3,505
5			0,705	0,522	4,478	4,581

Paron 910 - R \square t [m Ω]						
cesta	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	71,927	67,720	41,952	66,413		31,400
2	64,878	67,317	37,320	56,980		
3	60,098	69,854	36,528	62,722		21,556
4	63,171	67,439	41,087	69,130		
5		82,171	43,182	73,909		23,333

Paron 910 - R \square t [m Ω]						
cesta	A7	A8	A9	A10	A11	A12
1		41,268		87,333	99,800	91,800
2		32,585	75,600	83,640		
3	24,898	30,283	79,361	90,667	90,272	77,802
4	28,317	26,012	76,739	91,217	113,415	104,992
5	61,193		78,636	83,545	120,915	106,928

Paron 910 - R \square t [m Ω]						
cesta	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1	48,293	47,341	32,175	40,746	49,500	27,200
2	52,415	45,610	36,280	35,620		
3	47,551	45,932	39,333	37,833	46,790	32,148
4	56,951	48,951	43,957	40,435	40,423	52,081
5	65,049	55,998	40,182	39,727	31,399	43,346

Paron 910 - R \square t [m Ω]						
cesta	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	34,793	45,732	48,143	45,556	65,000	48,100
2	38,000	40,976	47,980	46,220		
3	35,024	41,015	52,278	47,278	51,531	42,296
4	33,085	34,268	50,565	44,870	58,602	48,699
5	43,595		46,818	40,273	53,124	43,333

Paron 910 - R \square t [m Ω]						
cesta	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	48,585	50,122			27,300	27,800
2	48,878	50,000	40,520	38,340		
3	53,990	53,483	40,917	42,167		21,704
4	56,110	56,744	31,913	51,565		23,008
5	66,563	74,378	45,000	56,000	25,203	20,824

Paron 910 - R _{ot} [mΩ]						
cesta	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1	68,232	39,915	70,127	68,651	54,900	47,500
2	38,244	36,195	61,660	55,980		
3	31,083	36,254	61,000	55,333	52,494	46,790
4	37,463	37,134	63,478	55,000	62,715	56,992
5			64,091	47,455	58,536	59,882

Paron 910 - R _{or} [mΩ]						
cesta	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1	49,259	49,235				26,112
2	53,987	47,890				
3	49,929	46,506	46,020	41,238		
4	60,368	50,909	49,671	41,243		
5		61,597	41,387	38,138		
cesta	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1					65,650	49,062
2			49,419	47,144		
3			51,232	47,278		43,142
4	37,056	49,346	54,610	45,767	58,602	49,186
5				41,884		43,767
cesta	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	49,580					
2	58,180		40,271	38,113		
3	48,086	50,525	39,333	44,265	52,405	
4	57,179	47,972	48,792		40,423	
5						
cesta	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1			50,550	55,122		50,986
2	38,760		49,419	52,229		
3	38,089	52,294	51,232	52,006	59,260	47,372
4	43,673	45,920	57,139	46,216	61,532	56,004
5			51,032	48,327	57,905	

CSP 3110D - R [Ω]						
cesta	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	1,531	1,535	5,207	6,290	0,719	0,546
2	2,799	2,484	3,340	3,369	0,529	0,545
3	4,728	3,586	2,333	2,302	2,952	2,490
4			1,446	1,488	5,034	4,918
5			0,985	0,711	5,045	4,590

CSP 3110D - R [Ω]						
cesta	A7	A8	A9	A10	A11	A12
1	1,930	2,222	4,391	4,083	0,591	0,565
2	5,100	4,485	3,396	4,071	0,540	0,466
3	5,890	7,440	2,345	2,443	3,047	2,166
4	14,110		1,320	1,443	5,291	3,519
5			0,563	0,739	5,992	4,823

CSP 3110D - R [Ω]						
cesta	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1	1,508	1,591	5,878	4,521	0,972	0,645
2	2,287	2,662	3,525	3,164	0,701	0,583
3	3,034	3,659	2,271	1,953	3,484	2,982
4	8,090	10,960	1,565	1,277	4,500	5,020
5			0,585	0,558	5,501	5,223

CSP 3110D - R [Ω]						
cesta	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	2,062	2,552	3,795	4,190	0,634	0,666
2	3,693	3,525	3,193	3,262	0,437	0,571
3			2,464	2,370	2,190	2,416
4	9,235		1,396	1,469	3,733	3,810
5			0,587	0,507	4,604	4,120

CSP 3110D - R [Ω]						
cesta	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	1,649	1,656	4,130	4,077	0,768	0,754
2	2,375	2,752	3,023	4,575	0,449	0,632
3	3,238	3,832	2,264	3,402	3,864	3,311
4			1,596	2,135	7,122	4,772
5			0,566	1,065	6,635	4,600

CSP 3110D - R [Ω]						
cesta	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1		2,097	7,176	6,529	0,512	0,649
2		3,861	4,836	4,558	0,433	0,522
3	8,594		2,610	2,471	2,208	2,307
4	49,820		1,466	1,498	3,588	4,324
5			0,644	0,729	4,327	4,591

CSP 3110D - R _{ot} [mΩ]						
cesta	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	56,012	56,159	82,651	99,841	71,900	54,600
2	68,268	60,585	66,800	67,380	62,235	64,118
3	92,254	69,971	64,806	63,944	72,889	61,481
4			62,870	64,696	81,854	79,967
5			89,545	64,636	65,948	60,000

CSP 3110D - R _{ot} [mΩ]						
cesta	A7	A8	A9	A10	A11	A12
1	70,610	81,293	69,698	64,810	59,100	56,500
2	124,390	109,390	67,920	81,420	63,529	54,824
3	114,927	145,171	65,139	67,861	75,235	53,481
4	172,073		57,391	62,739	86,033	57,220
5			51,182	67,182	78,327	63,046

CSP 3110D - R _{ot} [mΩ]						
cesta	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1	55,171	58,207	93,302	71,762	97,200	64,500
2	55,780	64,927	70,500	63,280	82,471	68,588
3	59,200	71,395	63,083	54,250	86,025	73,630
4	98,659	133,659	68,043	55,522	73,171	81,626
5			53,182	50,727	71,908	68,275

CSP 3110D - R _{ot} [mΩ]						
cesta	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	75,439	93,366	60,238	66,508	63,400	66,600
2	90,073	85,976	63,860	65,240	51,412	67,176
3			68,444	65,833	54,074	59,654
4	112,622		60,696	63,870	60,699	61,951
5			53,364	46,091	60,183	53,856

CSP 3110D - R _{ot} [mΩ]						
cesta	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	60,329	60,585	65,556	64,714	76,800	75,400
2	57,927	67,122	60,460	91,500	52,824	74,353
3	63,180	74,771	62,889	94,500	95,407	81,753
4			69,391	92,826	115,805	77,593
5			51,455	96,818	86,732	60,131

CSP 3110D - R _{ot} [mΩ]						
cesta	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1		76,720	113,905	103,635	51,200	64,900
2		94,171	96,720	91,160	50,941	61,412
3	167,688		72,500	68,639	54,519	56,963
4	607,561		63,739	65,130	58,341	70,309
5			58,545	66,273	56,562	60,013

CSP 3110D - R _□ [mΩ]						
cesta	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1	57,010	59,760	90,503	80,373	96,228	67,080
2	58,570	62,979	74,025	58,850	88,244	73,389
3	45,140	75,857	64,345	56,420	82,584	58,904
4	78,927	125,639	67,363	60,519	79,756	86,524
5			53,182	57,322		
cesta	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1			63,852	70,498	72,276	66,600
2		84,256	61,944	55,454	58,609	73,222
3			63,653	71,758	56,237	60,847
4	159,923		53,412	63,870	61,306	63,810
5			53,897	47,474	60,183	57,626
cesta	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1		62,201		70,539	102,144	66,352
2	63,720	66,451	62,274	87,840	59,691	
3	69,499	72,901	69,178	103,005	106,856	85,023
4			72,861	99,324	123,911	79,921
5			51,969	108,436	79,793	
cesta	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1			103,653	136,798	55,296	
2			94,786	95,718		
3			63,075	71,384	63,787	
4			59,915	70,341	60,092	
5			59,716	78,202		

Paron 920 - R [kΩ]						
cesta	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	3,280	3,080	11,590	15,670	1,640	1,410
2	4,810	6,420	9,320	5,820	0,985	0,720
3	9,460	9,750	5,660	3,910		4,020
4		50,590	3,200	2,670		6,490
5			1,260	1,130		

Paron 920 - R [kΩ]						
cesta	A7	A8	A9	A10	A11	A12
1				12,610	1,410	0,941
2			6,570	5,810	0,867	1,160
3	5,570	4,410	5,720	4,280	4,600	4,610
4			3,520	2,700	7,610	7,370
5			1,350	1,080	8,270	7,770

Paron 920 - R [kΩ]						
cesta	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1	2,740	2,330	9,430		0,892	0,926
2	4,360	3,550	6,120	4,320	0,791	0,747
3	8,290	5,160	3,840	2,920	4,090	3,990
4			2,080	1,980	9,190	6,640
5			0,887	0,874		5,860

Paron 920 - R [kΩ]						
cesta	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	1,630	1,140		5,870	0,926	0,968
2	5,190	1,710		5,990	0,612	0,759
3	8,500	3,800	5,470	3,820	3,590	4,130
4	28,900		2,270	2,150	6,690	7,120
5			0,936	0,726	8,190	7,750

Paron 920 - R [kΩ]						
cesta	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	3,030	2,370	14,420	9,820	1,005	0,704
2	4,270	4,260	7,260	5,030	0,757	0,586
3	7,360	7,420	4,180	3,120	3,980	2,980
4			2,520	2,210	6,720	4,480
5			1,026	0,989	6,000	

Paron 920 - R [kΩ]						
cesta	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1			5,620	5,390	1,050	0,862
2		2,770	5,170	4,910	0,816	0,713
3	3,960	4,430	4,290	3,480	4,210	3,290
4	8,540	9,960	2,390	2,120	7,240	5,060
5			0,881	0,848	8,060	5,980

Paron 920 - R _{tot} [Ω]						
cesta	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	120,000	112,683	183,968	248,730	164,000	141,000
2	117,317	156,585	186,400	116,400	115,882	84,706
3	184,585	190,244	157,222	108,611		99,259
4		616,951	139,130	116,087		105,528
5			114,545	102,727		

Paron 920 - R _{tot} [Ω]						
cesta	A7	A8	A9	A10	A11	A12
1				200,159	141,000	94,100
2			131,400	116,200	102,000	136,471
3	108,683	86,049	158,889	118,889	113,580	113,827
4			153,043	117,391	123,740	119,837
5			122,727	98,182	108,105	101,569

Paron 920 - R _{ot} [Ω]						
cesta	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1	100,244	85,244	149,683		89,200	92,600
2	106,341	86,585	122,400	86,400	93,059	87,882
3	161,756	100,683	106,667	81,111	100,988	98,519
4			90,435	86,087	149,431	107,967
5			80,636	79,455		76,601

Paron 920 - R _{ot} [Ω]						
cesta	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	59,634	41,707		93,175	92,600	96,800
2	126,585	41,707		119,800	72,000	89,294
3	165,854	74,146	151,944	106,111	88,642	101,975
4	352,439		98,696	93,478	108,780	115,772
5			85,091	66,000	107,059	101,307

Paron 920 - R _{ot} [Ω]						
cesta	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	110,854	86,707	228,889	155,873	100,500	70,400
2	104,146	103,902	145,200	100,600	89,059	68,941
3	143,610	144,780	116,111	86,667	98,272	73,580
4			109,565	96,087	109,268	72,846
5			93,273	89,909	78,431	

Paron 920 - R _{ot} [Ω]						
cesta	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1			89,206	85,556	105,000	86,200
2		67,561	103,400	98,200	96,000	83,882
3	77,268	86,439	119,167	96,667	103,951	81,235
4	104,146	121,463	103,913	92,174	117,724	82,276
5			80,091	77,091	105,359	78,170

Paron 920 - R _{or} [Ω]						
cesta	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1	100,244	96,041				99,082
2	108,468	89,183	121,176	94,176		101,065
3	153,668	105,717	104,533	82,733		98,519
4			93,148	98,139		
5			79,830	78,660		
cesta	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1				88,516	94,452	109,384
2				117,404	77,040	94,652
3			142,828	96,561	102,825	125,430
4			100,670	87,870	108,780	129,665
5			76,582	71,280	122,047	
cesta	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	113,810	85,551			112,560	77,440
2	107,271	112,215	140,844	87,522	92,621	71,009
3	145,405	146,590	123,078	76,267	99,254	72,844
4			101,896	95,126	97,249	74,302
5			96,071	104,295		
cesta	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1				95,822	110,250	83,614
2				95,254	97,920	92,271
3	92,722			73,467	106,030	82,047
4	104,146			82,035	117,724	79,808
5				81,716	106,413	82,860

Paron 350 - R [MΩ]						
cesta	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	4,450		21,940	104,400	12,900	1,060
2	6,320		9,860	13,130	1,650	0,920
3	7,890	9,840	7,520	7,280	8,690	6,230
4	24,260	36,200	5,020	4,570	11,970	26,540
5	122,500		2,152	1,890	20,700	34,150

Paron 350 - R [MΩ]						
cesta	A7	A8	A9	A10	A11	A12
1	5,750	29,670	89,940	61,260	1,530	1,290
2	12,000	12,100	10,250	9,590	1,050	0,950
3	23,090	23,040	6,680	6,090	6,650	5,160
4	36,350	36,130	4,020	3,580	20,900	12,060
5	41,400	41,100	1,490	1,570	20,270	

Paron 350 (1 hodina 180 °C) - R [Ω]						
cesta	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1		2,200		6,820	0,790	0,880
2	2,400	2,320	3,530	3,920	0,350	0,650
3	3,560	3,000	1,930	2,550	2,000	3,150
4	7,380	5,160	1,100	1,620	3,680	6,640
5	22,740		0,490	0,630	5,720	9,600

Paron 350 (1 hodina 180 °C) - R [Ω]						
cesta	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	2,190	2,570	4,920	5,030		0,500
2	2,510	2,400	2,590	2,870		0,370
3	2,610	3,240	1,570	2,050		2,090
4	4,610	5,260	1,000	1,490		4,190
5	7,770		0,420	0,730		8,340

Paron 350 (30 min ve slané vodě) - R [Ω]						
cesta	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0,620	0,690	1,770	1,370	0,165	0,224
2	0,930	0,910	1,400	1,040	0,141	0,192
3	1,400	1,190	0,920	0,720	0,850	0,910
4	2,800		0,607	0,470	2,140	1,530
5			0,510	0,219	1,940	1,550

Paron 350 (30 min ve slané vodě) - R [Ω]						
cesta	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1	0,750	0,490	1,640	1,630	0,230	0,320
2	1,500	0,820	1,210		0,153	0,180
3	6,365	1,270	0,890	2,420	0,810	0,980
4			0,790	0,630	1,610	1,490
5			0,430	0,230		1,730

Paron 350 (1 hodina 180 °C) - R \square [m Ω]						
cesta	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1					73,470	80,960
2	61,463	57,717	88,956	81,536	41,588	78,765
3	75,541	55,610	52,539	70,833	57,284	64,556
4	97,200	52,859	54,043	74,661	59,239	100,410
5			44,991	63,000	71,033	120,471

Paron 350 (1 hodina 180 °C) - R \square [m Ω]						
cesta	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	75,315	105,934		74,252		58,000
2		63,805	51,282	55,104		
3	49,017	52,946	45,792	55,236		55,217
4	69,712		45,652	64,135		78,350
5			40,091	69,682		

Paron 350 (30 min ve slané vodě) - R _{□r} [mΩ]						
cesta	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	22,532	26,085		25,443	17,655	23,072
2	23,363	22,195	30,520	21,632	18,413	22,136
3	27,317	22,059	27,089	22,200	21,407	22,694
4	34,829		26,655	20,843	38,972	
5				20,307		

Paron 350 (30 min ve slané vodě) - R _{□r} [mΩ]						
cesta	C7	C8	C9	C10	C11	C12
1			24,210	27,684		33,920
2	32,561	26,800	22,990			22,871
3		28,807	26,700			27,101
4			35,378	30,404		24,712
5			37,918	22,791		

Paron 910												
cesta	B1		B2		B3		B4		B5		B6	
	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1	2,75	1,53	4,07	1,56							12,4	0,96
2	5,44	1,03	4,06	1,05							14,7	0,99
3	5,88	0,84	3,23	0,81	5,43	1,17	3,55	1,09				
4	5,85	0,53	4,46	0,52	7,87	1,13	3,94	1,02				
5			2,92	0,33	5,3	1,03	3,76	0,96				
cesta	B7		B8		B9		B10		B11		B12	
	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1									2,4	1,01	5,26	1,02
2					3,46	1,03	4,99	1,02				
3					3,48	0,98	2,73	1			2,64	1,02
4	12,3	0,56	14,6	0,72	1,88	1,08	2,73	1,02	2,71	1	2,9	1,01
5							4,68	1,04			3,64	1,01
cesta	C1		C2		C3		C4		C5		C6	
	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1	5,13	1,54										
2	4,85	1,11			6,99	1,11	4,67	1,07				
3	5,03	0,809	3,67	0,88	4,93	1	4,8	1,17	7,27	1,12		
4	4,53	0,502	4,59	0,49	5,12	1,11			3,48	1		
5	5,08	0,35										
cesta	C7		C8		C9		C10		C11		C12	
	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1					3,73	1,05	5,22	1,21			4,71	1,06
2	5,4	1,02			4,55	1,03	4,26	1,13				
3	4,12	0,87	7,07	1,02	3,75	0,98	5,63	1,1	5,61	1,15	5,66	1,12
4	5,34	0,66	7,12	0,67	4,75	1,13	4,39	1,03	5,95	1,05	6,04	1,15
5			4,85	0,57	6,2	1,09	6,52	1,2	6,84	1,09		

CSP 3110D												
	B1		B2		B3		B4		B5		B6	
cesta	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1	9,6	1,55	9,49	1,54	7,18	0,97	7,05	1,12	9,7	0,99	7,37	1,04
2	6,47	1,05	8,37	0,97	5,93	1,05	6,81	0,93	8,43	1,07	6,74	1,07
3	6,08	0,61	7,57	0,85	6,04	1,02	8,94	1,04	8,46	0,96	8,63	0,8
4	3,79	0,4	6,37	0,47	7,39	0,99	7,96	1,09	5,14	1,09	7,75	1,06
5					5,66	1	7,55	1,13				
	B7		B8		B9		B10		B11		B12	
cesta	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1					6,13	1,06	5,95	1,06	9,11	1,14	7,1	1
2			4,63	0,98	7,89	0,97	7,47	0,85	6,73	1,14	7,77	1,09
3			5,04	0,92	10,5	0,93	7,47	1,09	7,45	1,04	7,57	1,02
4	4,19	0,71	3,49	0,53	9,24	0,88	7,8	1	7,52	1,01	6,2	1,03
5					6,96	1,01	8,75	1,03	7,01	1	6,51	1,07
	C1		C2		C3		C4		C5		C6	
cesta	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1			9,05	1,54			9,79	1,09	4,93	1,33	5,76	0,88
2	6,22	1,1	7,51	0,99	7,67	1,03	5,99	0,96	5,33	1,13		
3	8,25	0,88	7,14	0,78	6,75	1,1	7,19	1,09	5,42	1,12	6,18	1,04
4	6,46	0,54	5,84	0,47	5,13	1,05	4,63	1,07	5,43	1,07	4,08	1,03
5					6,82	1,01	5,81	1,12	5,57	0,92		
	C7		C8		C9		C10		C11		C12	
cesta	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1					6,04	0,91	4,33	1,32	9,31	1,08		
2					9,53	0,98	4,62	1,05				
3					6,87	0,87	7,77	1,04	9,69	1,17		
4					7,91	0,94	8,5	1,08	9,32	1,03		
5					6,92	1,02	7,61	1,18				

Paron 920												
	B1		B2		B3		B4		B5		B6	
cesta	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1	5,71	1,5	4	1,69							4,29	1,07
2	5,29	1,02	4,97	1,03	3,04	0,99	2,96	1,09			3,49	1,15
3	2,41	0,76	3,58	0,84	2,7	0,98	3,35	1,02			4,17	1
4	1,71	0,588	2,26	0,52	2,65	1,03	2,82	1,14				
5					4,11	0,99	4,47	0,99				
	B7		B8		B9		B10		B11		B12	
cesta	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1					2,65	0,96	3,18	0,95	2,9	1,02	2,08	1,13
2					3,71	1,05	3,59	0,98	3,33	1,07	4,26	1,06
3					3,08	0,94	4,4	0,91	4,17	1,16	4	1,23
4					2,91	1,02	4,7	0,94	3,8	1	4,22	1,12
5					2,77	0,9	3,32	1,08	4,68	1,14		
	C1		C2		C3		C4		C5		C6	
cesta	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1	5,36	1,54	4,72	1,48	3,98	0,91			4,15	1,12	3,96	1,1
2	5,55	1,03	3,8	1,08	4,21	0,97	3,15	0,87	3,18	1,04	3,4	1,03
3	3,76	0,81	3,63	0,81	4,5	1,06	4,6	0,88	4,76	1,01	3,14	0,99
4					4,35	0,93	4,15	0,99	4,75	0,89	4,87	1,02
5					5,76	1,03	4,93	1,16			6,96	1,02
	C7		C8		C9		C10		C11		C12	
cesta	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1							6,16	1,12	4,98	1,05	3,51	0,97
2	3,3	0,97					4,39	0,97	4,55	1,02	3,79	1,1
3	4,28	0,96					4,62	0,76	4,02	1,02	3,28	1,01
4	4,59	0,5					6,58	0,89	4,87	1	6,26	0,97
5							6,14	1,06	3,7	1,01	4,48	1,06

Paron 350												
	B1		B2		B3		B4		B5		B6	
cesta	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1	4,3	1,49	3,45	1,55			2,11	1,17	2,04	1,07	3,76	1,03
2	2,78	1,03	2,19	1	3,7	1,09	3,2	1,04	2,95	1,11	2,33	0,98
3	3,19	0,8	3	0,76	2,22	1,06	2,55	1,11	2,89	1,02	2,69	1,01
4	3,4	0,51	2,53	0,58	3,25	1,01	2,07	1,02	2,37	1,12		
5	2,06	0,31	1,78	0,23	2,39	1,11	2	1,02				
	B7		B8		B9		B10		B11		B12	
cesta	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1					3,47	0,93	3,04	1,07			4,04	1,06
2	3,51	0,89	2,49	1,34	2,11	0,95	2,73	1,07			3,06	1,08
3	2,08	0,86	2,51	0,93	2,67	1,08	2,72	1,02			2,49	1,12
4	2,06	0,55	3,11	0,63	3,32	1,03	2,06	1,11			3,14	1,02
5	2,57	0,34			2,97	0,97	2,64	1,09				
	C1		C2		C3		C4		C5		C6	
cesta	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1	2,15	1,81							2,15	0,93	2,14	0,92
2	2,8	1,05	2,67	1,02	2,75	1,26	3,94	1,04	2,95	1,01	2,74	1,03
3	2,57	0,87	3,02	0,76	2,5	0,98	3,11	1	3,5	1,16	2,4	0,83
4	2,89	0,54	1,98	0,42	3,67	1,13	4,18	1,06	2,35	0,99	2,44	0,93
5					3,61	1,01	3,42	1,1	2,6	0,95	2,46	0,96
	C7		C8		C9		C10		C11		C12	
cesta	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)	h (μm)	w (mm)
1	3,82	1,41	3,84	1,69			2,38	0,93	3,28	1,01	4,39	1,16
2			3,24	1,09	3,17	0,99	2,96	0,96				
3	2,84	0,77	3,99	0,67	2,17	1,05	3,07	0,97	3,87	1,36	2,99	1,07
4	3,15	0,62			2,27	1,05	3,99	0,99	2,88	1,14	3,27	1,15
5					2,88	1,05	2,83	1,05				