

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



Bakalářská práce

Porovnání metod pro vytváření tištěných vodivých vrstev

Autor: Jakub Dobiáš

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

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dobiáš** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **499336**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Porovnání metod pro vytváření tištěných vodivých vrstev

Název bakalářské práce anglicky:

The comparison of methods for printed conductive layers preparation

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s dostupnými tlustovrstevnými technologiemi (sítotisk a tiskárna Voltera).
2. Vytvořte vzorky stříbrných vodivých struktur.
3. Proveďte elektrická a optická měření a analýzu vytvořených vzorků.
4. Porovnejte tlustovrstvé technologie na základě získaných výsledků.

Seznam doporučené literatury:

- [1] PAVEL MACH, JAN URBÁNEK a VLASTIMIL SKOČIL. Montáž v elektronice: pouzření aktivních součástek, plošné spoje. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
[2] MICHAEL I. PANZINI. Thick Films: Properties, Technology, and Applications. Nova Science Publishers, 2012. ISBN 1614703841, 9781614703846
[3] V-One Support [online]. Dostupné z: <https://docs.voltera.io/v-one/>

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: **19.09.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **09.01.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **16.02.2025**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
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

.....

Podpis autora práce

Poděkování

Rád bych zde vyjádřil své upřímné díky všem, kteří mi pomohli s bakalářskou prací na téma Porovnání metod pro vytváření tištěných vodivých vrstev. Především děkuji Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za ukázkové vedení práce, její konstruktivní kritiku a odborné rady. Dále bych chtěl poděkovat své milující rodině a slečně Adéle Tvrdkové za podporu nejen během psaní této práce ale i po celou dobu mého předcházejícího studia.

Abstrakt

V této práci Vás seznámím se dvěma výrobními technologiemi k vytváření tištěných vodivých vrstev. Jedná se o sítotisk a Volteru V-One. Obě zařízení nanášejí různé tlustovrstvé pasty na nosné nevodivé podložky svým specifickým způsobem. Na sítotisku bylo použito pasty Paron-910, na Voltera V-One pak pasty Conductor 2 Lot: TrickyTanuki.

Pomocí obou zařízení jsem zhotovil celkem 18 vzorků tří různých motivů. Vzorky jsem porovnal na základě elektrických a optických měření. Zkoumal jsem především odpory a odpory na čtverec jednotlivých vodivých cest. K tomuto měření jsem použil multimetr Mastech MY 75. Dále jsem vzorky podrobil výškové analýze použitím měřicího přístroje Form Talysurf Intra. Nakonec jsem pořídil pár snímků vrstev pod mikroskopem.

Z provedených měření a následného porovnání jsem došel k závěru, že sítotisk je z vybraných dvou technologií lepší. Vrstvy vyrobené touto metodou mají menší odpor a jsou nižší. Sítotisk se také dopouští menší chybovosti. Není tedy překvapením, že je sítotisk nejrozšířenější a nejpoužívanější výrobní metodou.

Klíčová slova:

Tištěné vrstvy v elektronice, sítotisk, Voltera V-One, tlustovrstvé technologie, tlustovrstvé pasty, odpor na čtverec

Abstract

I am going to introduce you to two technologies for printing conductive layers. The two technologies are screenprinting and Voltera V-One. Both devices use a different method for applying conductive pastes to a nonconducting pad. I used conductive silver paste Paron-910 for screenprinting and Conductor 2 Lot: TrickyTanuki paste for Voltera V-One.

Using both devices, I produced a total number of eighteen samples for three different motifs. I compared those samples based on electrical and optical measurements. I measured resistances with a multimeter Mastech MY 75 and then calculated resistances per square. After that, I submitted the samples to a height analysis using a measuring device called Form Talysurf Intra. I also took a few pictures of the printed layers with a microscope.

From the measurements and subsequent comparison, I concluded that screen printing is preferable among the two selected technologies. Layers made by this method have less resistance and are smaller in height. Screen printing also makes fewer errors. It is therefore no surprise that screen printing is the most widespread and used production method.

Keywords:

Printed layers in electronics, screenprinting, Voltera V-One, thick film technologies, thick film pastes, resistance per square

Seznam obrázků

Obrázek 1: Voltera V-One [14]	- 18 -
Obrázek 2: závislost teploty na čase – začátek vytvrzování	- 19 -
Obrázek 3 - závislost teploty na čase – konec vytvrzování	- 20 -
Obrázek 4: popis rozměrů tlusté vrstvy.....	- 23 -
Obrázek 5: Form Talysurf Intra [10].....	- 24 -
Obrázek 6: mikroskop Vision Engineering	- 24 -
Obrázek 7: Motiv č. 1	- 25 -
Obrázek 8: Motiv č. 2	- 25 -
Obrázek 9: Motiv č. 3	- 26 -
Obrázek 10: Porovnání velikosti odporů jednotlivých cest motivu č. 1	- 28 -
Obrázek 11: Porovnání odporů na čtverec v závislosti na šířce vrstvy.....	- 28 -
Obrázek 12: porovnání odporů na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) v závislosti na šířce vrstvy	- 29 -
Obrázek 13: Porovnání velikosti odporů jednotlivých cest motivu č. 2	- 30 -
Obrázek 14: Porovnání odporů na čtverec v závislosti na délce vrstvy.....	- 31 -
Obrázek 15: porovnání odporů na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) v závislosti na šířce vrstvy	- 31 -
Obrázek 16: Porovnání velikosti odporů jednotlivých cest motivu č. 3	- 32 -
Obrázek 17: Porovnání odporů na čtverec v závislosti na délce vrstvy.....	- 33 -
Obrázek 18: porovnání odporů na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) v závislosti na šířce vrstvy	- 33 -
Obrázek 19: výškový profil motivu č.1 (sítotisk, $w = 0,5 \text{ mm}$)	- 34 -
Obrázek 20: výškový profil motivu č.1 (Voltera, $w = 1 \text{ mm}$)	- 34 -
Obrázek 21: typický profil vrstvy nanesené sítotiskem.....	- 36 -
Obrázek 22: typický profil vrstvy nanesené Volterou	- 36 -
Obrázek 23: nespojená cesta 9-10 motivu č. 1 - sítotisk.....	- 37 -
Obrázek 24: nespojená cesta 9-10 motivu č. 1 – Voltera.....	- 37 -
Obrázek 25: občasná ucpaná oka – sítotisk	- 38 -
Obrázek 26: málo nanesené pasty – Voltera.....	- 38 -
Obrázek 27: detail obrázku 26.....	- 38 -
Obrázek 28: zakřivení cest motivu č. 3 – Voltera.....	- 39 -

Seznam tabulek

Tabulka 1: určení parametrů cest motivu č. 1	- 25 -
Tabulka 2: určení parametrů cest motivu č. 2	- 25 -
Tabulka 3: určení parametrů cest motivu č. 3	- 26 -
Tabulka 4: Velikost odporů jednotlivých cest motivu č. 1	- 27 -
Tabulka 5: Velikost odporů jednotlivých cest motivu č. 2	- 30 -
Tabulka 6: Velikost odporů jednotlivých cest motivu č. 3	- 32 -
Tabulka 7: průměrné naměřené výšky vrstev	- 35 -

Obsah

1. Úvod	- 10 -
2. Tlusté vrstvy	- 11 -
3. Pasty tlustovrstvých technologií	- 13 -
4. Síťotisk	- 15 -
4.1. Síťky pro síťotisk	- 16 -
4.2. Těrky pro síťotisk.....	- 17 -
4.3. Konkrétní popis použité pasty	- 17 -
5. Voltera V-One	- 18 -
5.1. Popis zařízení Voltera V-One.....	- 18 -
5.2. Práce na zařízení Voltera V-One.....	- 20 -
5.3. Konkrétní popis použité pasty	- 21 -
6. Kontrola kvality	- 22 -
7. Motivy cest	- 25 -
8. Analýza naměřených hodnot	- 27 -
8.1. Elektrické vlastnosti.....	- 27 -
8.1.1. Motiv č. 1.....	- 27 -
8.1.2. Motiv č. 2.....	- 30 -
8.1.3. Motiv č. 3.....	- 32 -
8.2. Výškové profily.....	- 34 -
8.3. Mikroskopické zkoumání	- 36 -
9. Porovnání technologií síťotisku a Voltery	- 40 -
10. Závěr	- 42 -
Reference	- 43 -

1. Úvod

Tištěné vrstvy mají široké uplatnění v elektrotechnice. Najdeme je v celé škále zařízení, nejčastěji jako plošné propojení mezi různými součástkami umístěnými na nevodivých destičkách. Využití takovýchto karet je nespočetné. Výhodou tištěných vrstev je možnost plnit vodivou, odporovou nebo i dielektrickou funkci.

Cílem této práce je porovnat a seznámit se s výrobními metodami sítotisk a Voltera V-One (dále jen „Voltera“). Pomocí těchto zařízení následně vyrobí natištěné vodivé vrstvy. Porovnání metod bude provedeno na základě elektrických a optických měření zhotovených vzorků.

V teoretické části této práce popisují, co představuje pojem tištěné vrstvy v elektrotechnice a z jakých past jsou obvykle vyráběny. Následně rozeberu podrobněji obě výrobní metody, které byly v této práci použity k tisku tří vybraných motivů.

Ve své praktické části zhotovím pro každý motiv tři vzorky pomocí sítotisku a tři vzorky pomocí Voltery. Výrobky porovnám z několika hledisek. Podrobně budu zkoumat primárně elektrické vlastnosti, ale také výrobní procesy, chybovosti výrobních metod a výškové profily nanesených vrstev. Elektrické parametry výrobků porovnám s hodnotami uvedených od výrobců past.

2. Tlusté vrstvy

Tlusté vrstvy se řadí do vrstevových technologií. Umožňují propojení jednotlivých elektrických struktur klasickými plošnými spoji. Jedná se o nanesené vrstvy past na nosnou nevodivou podložku. Význam této technologie stoupá díky umožnění dosáhnout vyšší přesnosti jednotlivých spojů, než je jinými výrobními technologiemi možné. Pomocí tlustých vrstev jsme schopni vytvořit přesné cesty o tloušťce v řádech desítek mikrometrů. Další výhodou je možnost vytvoření nejen vodivé, ale i odporové a také dielektrické cesty. Tudíž uplatnění tlustých vrstev se nachází v celé řadě elektrických zařízení. [5, str. 356]

Tloušťka tlusté vrstvy je podstatně delší než střední volná dráha elektronu – průměrná vzdálenost, kterou elektron urazí předtím, než se střetne, srazí s jinou částicí v materiálu. [1], [4], [13]

Tištěná vrstva je vytvořena z pasty nanesené na nosnou nevodivou desku. Samotným nanesením ale výrobní proces ještě není u konce. Dále je na řadě proces sušení, během kterého dojde k vyrovnání nehomogenity na povrchu vrstvy. Finální elektrické a mechanické vlastnosti dostane vrstva až po vytvrzení. Tedy po vypečení v peci při stanovené teplotě po daný čas. Takto zhotovený celek nazýváme tlustou vrstvou. [1], [4]

Mezi základní tlustovrstvové technologie patří například:

- sítotisk ruční nebo automatický
- Voltera V-one
- šablonový tisk, sprejování, plazmatické nanášení aj.

V této práci se budu podrobněji zabývat ručním sítotiskem a prací na zařízení Voltera V-one. Sítotisk je nejrozšířenější a nejpoužívanější výrobní metodou. Je vhodný pro sériovou výrobu, jelikož s hotovou sítkou je proces nanášení pasty na desku velmi rychlý. Naopak jakékoli provádění malých změn v motivu, například při výrobě nového prototypu, je náročné. K tomuto účelu je naopak vhodné použít Volteru na níž se dá motiv jednoduše upravit v návrhovém programu EAGLE od společnosti Autodesk. Poté se nový motiv vytiskne, vysuší a vytvrdí. Takto zhotovený výrobek je během cca jedné hodiny připraven k testování. Kdyby se k výrobě nových produktů používalo výrobní technologie sítotisku, bylo by před každým novým prototypem potřeba vytvořit novou sítku, což by bylo časově i ekonomicky výrazně namáhavější. [13]

Šablonový tisk je velmi podobný sítotisku, dal by se dokonce označit za jeho následovníka. Úlohu síta přebrala fólie, jež kdysi byla kovová (mosaz, nerezová ocel, měď). Dnes už se používají plastové vykazující lepší vlastnosti – hlavně v pružnosti. Jejich další výhodou je levnější cenová relace při potřebě větší tloušťky fólie tedy i větší tloušťky nanesené vrstvy. [5]

„Rozvoj elektroniky přivedl i nová řešení vytváření obrazců, a i tady vystávají potíže s čistotou českého jazyka. Nazvat dispensing dávkováním a jetting tryskáním je samozřejmě možné, ale asi by ne zcela vystihovalo zmíněné procesy.“ [5, str. 301]

„Logicky i podle překladu některé literatury jsou vlastně oba druhy tisku šablonové, s tím že jednou je šablona ze síta a podruhé z fólie. Měli bychom tedy správně sítotisk nazývat tiskem síťovou šablonou a šablonový tisk tiskem foliovou šablonou.“ [5, str. 301]

3. Pasty tlustovrstvých technologií

Pasty pro síťotisk i pro zařízení Voltera V-One jsou tekuté směsi, které se aplikují na plochy nosných nevodivých podložek. Tyto pasty se po nanesení suší a vytvrzují. Sušením se zajistí vyrovnaní nehomogenit na povrchu nanesené vrstvy. Vytvrzením dojde ke svaření s plošnými spojeními a k vytvoření hotové tlusté vrstvy. [2], [4]

Nárůst požadavků na složitost motivů plošných spojů, nové výrobní procesy ale také i ekologické důvody vedly k vytvoření nových past, jež nahradily původní klasické pasty pro síťotisk. V základu můžeme pasty dělit na dvě skupiny a to podle způsobu jejich sušení nebo tvrzení. [5]

Pasty z první skupiny jsou sušené nebo tvrzené teplem. „Ty obsahují typy pryskyřic jako je bisfenol-A epoxid, epoxidové novolakové, fenolické, polyesterové, močovinoformaldehydové, alkydové apod.“ [5, str. 313] Obě pasty, které jsem ve své práci použil, patří do této skupiny a podrobněji se jimi zabývám v podkapitolách popisu jednotlivých výrobních metod. [5]

Druhou skupinu tvoří UV tvrditelné pryskyřice. Ve většině případech se jedná o estery kyseliny akrylové (C_2H_3COOH) a metakrylové s různými polyetery, epoxidy a uretany. [5]

Pryskyřice v pastě působí hlavně jako pojídlo pigmentů, plnidel a dalších všelijakých příměsí. Velmi podstatnou vlastností pasty je především přilnavost k nosné nevodivé podložce. Špatná adheze má zcela kritický vliv na kvalitu nanesené vrstvy. [5]

Pasta obsahuje funkční, pojící a technologickou složku:

- **Funkční složka** obsahuje prvky a sloučeniny dle použití. Například pro tisk vodivých cest se používají stříbro (Ag), platina (Pt), palladium (Pd), zlato (Au) nebo také slitiny (AgPd, AuPd), všechny uvedené prvky a sloučeniny jsou vhodné pro svou stálost a netečnost vůči vnějším vlivům. [2], [4], [13]

Pro tisk odporových cest se používá uhlík (C) a různé oxidy drahých kovů jako jsou: olovato-ruthenát ($Pb_2Ru_2O_7$), oxid ruthenium (Ru_2O). [2], [4], [13]

Pro tisk dielektrických cest se uplatňuje například následující sloučenina: trioxid barnato-titaničitý ($BaTiO_3$). [2], [4], [13]

- **Složka pojící** tvoří základní matici tlusté vrstvy a jak už její název napovídá, jejím hlavním účelem je spojovat, držet pohromadě, ale také chránit danou vrstvu. [2], [4], [13]
- **Složka technologická** je zpravidla olej, jež umožňuje vytvoření matlavé pasty, která obsahuje dokonale promíchanou pojící a funkční složku, což jsou zpravidla prášky. Technologická složka obsahuje pomocné složky jako jsou plastifikátory, stabilizátory, rozpouštědla, ředidla, plniva a řadu dalších přísad. Tyto pomocné složky pomáhají s nanášením pasty, zlepšují její vlastnosti jako je například tekutost, adheze, fotocitlivost nebo tvrditelnost. Technologická složka se při vytvrzování vrstvy odpařuje, tudíž výsledná struktura tlusté vrstvy je tvořena pouze funkční a pojící složkou. [2], [4], [5, str. 314], [13]

Pasty obsahují také **pigmenty**. Každý druh aplikace má svou přidělenou barvu. Pro plošné spoje je to modrá nebo zelená barva. Pigmenty v ní obsažené mají základ v organických komplexech mědi. Pro potisk se používají žluté a bílé pigmenty. S tímto typem pasty jsem pracoval v této práci. Černé nevodivé pigmenty se používají na nepájivých maskách a potiscích. Černé vodivé pigmenty se používají pro odporové dráhy. [5]

Rozpouštědla a ředidla: Mnoho pryskyřic, které se používají pro plošné spoje, jsou pevné nebo vysoce viskózní materiály. Pasty první skupiny, kde je pryskyřice sušená nebo tvrzená teplem, obsahují směs rozpouštědel, jejichž výběr se řídí rozpouštěcí schopností, rychlostí odpařování, cenou ale také samozřejmě ekologickým hlediskem. Viskozita je upravována ředidly z nízkomolekulárních akrylátů nebo metakrylových esterů. Ty na rozdíl od jiných ředidel neunikají, ale zůstávají v pastě, kde zesílují s pryskyřicí. Pasty druhé skupiny, tvrzené UV, obvykle neobsahují žádná těkavá rozpouštědla. [5]

Plniva: Slouží k reologii a k úpravě povrchu past – od lesku až po mat. Obvykle se jedná o inertní anorganické prášky. Které jsou buď syntetické (křemík) nebo přírodní (masek, síran barnatý). [5]

4. Sítotisk

Jedná se o výrobní metodu, při které se pomocí ručního sítotisku nanese pasta na nosnou nevodivou podložku dle motivu, jež nese síto. Tento proces se používá při výrobě menšího počtu výrobků. Pro výrobu většího množství je vhodnější použít automatizovaný sítotisk, který pracuje rychleji a přesněji než ruční sítotisk. Pohyb těrkou je prováděn strojem, tudíž je prováděn konstantní rychlostí a silou. Tyto dva faktory významně napomůžou k zajištění jednotné tloušťky vrstvy po celém rozsahu. Ručním sítotiskem tyto podmínky nejsme lidskou rukou schopni splnit.

Přibližný postup výroby tlustých vrstev pomocí ručního sítotisku by se dal popsat v následujících krocích:

1. **Příprava pasty** – na vytvoření kvalitní tištěné vrstvy je potřeba zvolit pastu, která bude pro danou aplikaci nejvhodnější. Například musí mít správnou adhezi k nosné podložce, musí obsahovat správnou funkční složku, musí vydržet zátěž ať už elektrickou tak mechanickou, které bude vystavěna. Podrobněji je tato problematika popsána v samostatné kapitole – Pasty tlustovrstvových technologií.
2. **Příprava sítotiskového nástroje** – před použitím a po ukončení používání sítotiskového nástroje je potřeba vždy pořádně vyčistit především síťku a těrku. Průchod pasty skrze oka síťky je absolutně zásadní. Správné kontrolované protlačení pasty skrze síto zajistí tu nejlepší kvalitu vytvořené tlusté vrstvy.
3. **Aplikace pasty** – na síťku, která nese požadovaný motiv a je upevněná a napnutá v rámu, nanese pastu po celé délce tisku a poté ji pomocí těrky protlačíme skrze oka síťky. Pohyb těrkou provádíme ve dvou směrech – tam a zpět. Tím vytvoříme vrstvu, která má přibližně konstantní tloušťku. Kdybychom prováděli pohyb těrkou jen v jednom směru, výsledná nanosená vrstva by byla klínovitá.
4. **Sušení** – po aplikaci pasty na nosnou desku je výrobek vyndán z nástroje a umístěn do sušárny ke krátkému sušení.
5. **Vytvrzení** – po sušení je výrobek umístěn do pece. Při vytvrzování vrstvy dojde ke svaření s nosnou podložkou a k vytvoření tlusté vrstvy, zároveň se z pasty odpařuje technologická složka. Každá pasta se vypéká při jiné teplotě a po jinou dobu. Jak dlouho a při jaké teplotě máme pastu vypalovat vždy najdeme na jejím obalu nebo v příbalovém letáku.

6. **Kontrola kvality** – jakmile je výrobní proces dokončen, provede se kontrola kvality spojů. Měřeny jsou především vodivost a výškové profily vrstev. Podrobněji se způsoby měření zabýváme v kapitole 6 Kontrola kvality.

4.1. Sít'ky pro sítotisk

Sít'ky jsou vyráběné z nylonu, terotonu nebo nerezových drátků. Vlákná síta se vybírají podle materiálu, který bude protlačován. Dále záleží na rozměru a nároku na přesnost motivu. Průměr drátku se obvykle pohybuje v řádech desítek mikrometrů. Podle rozdílu velikostí tkaniny d a oka w dělíme sít'ky do tří kategorií:

1. Velikost oka je větší než tloušťka vlákna ($w > d$).
2. Velikost oka je stejná než tloušťka vlákna ($w = d$).
3. Velikost oka je menší než tloušťka vlákna ($w < d$). [5, str. 302]

Tloušťka výsledné vrstvy je závislá na počtu vláken na cm a na velikosti ok. K zajištění dobrého průchodu pasty sítem je potřeba, aby velikost ok w byla minimálně 2,5 až 3krát větší, než jsou velikosti částic pasty. Sítotisková šablona nesoucí požadovaný motiv je vytvořena pomocí fotocitlivé emulze, jejíž výrobní proces vypadá následovně. Na síto nanese emulzi. Tu je potřeba důkladně vtlačit do všech ok tak, aby nikde nebyla žádná škvírka ani bublina. Nyní je na řadě sušení emulze, jež probíhá za úplné tmy. V další fázi na sítku umístíme průhlednou fólii, jež na sobě nese černou barvou natištěný motiv, a osvítíme ji. Po osvitu sundáme fólii a desku umístíme do vody. V místech, kde nebylo síto osvětleno, je emulze tvrdá a voda ji nepoškodí. Tam kde byla osvětlená, je emulze měkká a voda ji snadno vymyje. Nakonec je síto vysušeno, pak už je připravené k použití. [5], [6]

Sít'ka je umístěna zpravidla v kovovém rámu obdélníkového tvaru a vypnuta definovanou silou na speciálním vypínacím stole. Drátky musejí být elastické, aby se po přejetí těrkou vrátili do původního definovaného tvaru a bylo je možné znovu použít. Při přílišném tlaku těrkou by mohlo dojít k zdeformování sít'ky – poničení motivu, přetrhnutí drátku. Vlákná sít'ky jsou vedena diagonálně v rámu. Takto vedená vlákna umožňují natištění užších cest s menší šancí na chybovost než vlákna vedená kolmo na stěny rámu. Zásadní vliv na kvalitu natištěného motivu má ale také vzdálenost sít'ky od nosné desky, typ pasty a typ tkaniny. [2], [5]

Sít'ka použitá v této práci má 65 ok na centimetr. Je vyrobená z nylonu a umístěna v kovovém rámu. Vlákná síta jsou vedena diagonálně. Velikost ok je větší než tloušťka vlákna.

4.2. Těrky pro sítotisk

Pomocí těrky je pasta roztírána po ploše a vtlačována do ok síta. Typicky se jedná o plochou desku s břitem na spodní straně, který se pohybuje po sítu a je k němu přitlačován předepsanou silou. [5]

Pro sítotisk se používají těrky, jež musí splňovat několik požadavků pro výrobu kvalitních tlustých vrstev:

1. Struktura těrky – těrka musí mít hladký povrch bez vrásek a nerovností
2. Čistota – těrka musí být čistá, aby nekontaminovala pastu, ze které se tlusté vrstvy vytvářejí.
3. Pevnost a pružnost – těrka musí být dostatečně pevná a pružná, aby zůstala po celý čas v jedné poloze.
4. Chemická odolnost – těrka nesmí reagovat s pastou. [2]

Těrky se vyrábějí v zásadě ze dvou materiálů – pryže nebo kovu. Materiál těrky se volí podle specifických požadavků na daný projekt a na danou pastu. Výhodami pryžové těrky jsou cena, snadná výměna a možnost použití pro víceúrovňové a nerovné šablony. Nevýhodou je, že těrka nabírá pastu z otvorů. Nejsou tedy vhodné při tisku na sítu s velkými otvory. Kovové těrky jsou dražší a rychleji opotřebovávají šablony. Nenabírají z otvorů pastu, proto je jejich použití vhodné pro velké otvory. [5]

Dle aplikace se používají různě tvarované těrky:

1. Plošné těrky – tvar těrky připomíná obdélník
2. Kruhové těrky – tvar těrky připomíná kruh
3. Eliptické těrky – tvar těrky má eliptický tvar
4. Hranaté těrky – tvar těrky má trojúhelníkový tvar
5. Tvarově složitější těrky [2]

„Důležitá je rychlost posuvu těrky, její přítlak, kvalita povrchu a také úhel náklonu. Zvláště při ručním tisku je obtížné dodržet všechny tyto požadavky. Strojní tisk samozřejmě umožňuje lepší dodržení i volitelnost parametrů.“ [5, str. 313]

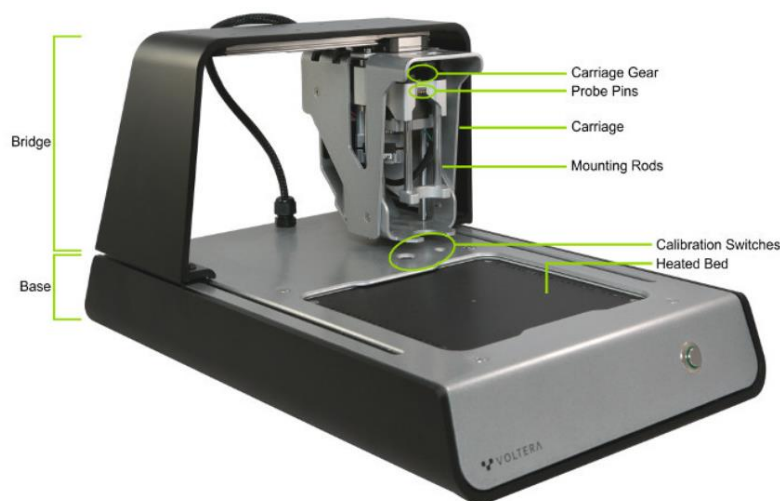
4.3. Konkrétní popis použité pasty

K výrobě tlustých vrstev pomocí sítotisku v této práci bylo použito stříbrné vodivé pasty Paron-910. Funkční složkou je stříbro. Vytvrzení této pasty se provádí při 130 °C po 30-60 minut. Typický odpor na čtverec (Vysvětleno podrobně v kapitole 6.) nanesené vrstvy výšky $h = 1 \text{ mil} \cong 25,4 \text{ } \mu\text{m}$ je 15-50 m Ω . Viskozita pasty je 15 Pa · s. [7]

5. Voltera V-One

Voltera je multifunkční zařízení určené k výrobě plošných spojů v prototypových a malosériových výrobních procesech. Umožňuje poměrně rychlou výrobu tištěných vrstev bez požadavku dalšího externího nářadí ani stroje. Poskytuje čtyři základní funkce – tisk vodivých cest, vrtání, dávkování pasty a vlastní vestavěnou píčku. Voltera přináší jednu hlavní výhodu oproti sítotisku: není potřeba vyrábět a skladovat specifické šablony. Zařízení samo nadávkuje pastu přímo na desku. Tento děj se dá přirovnat k 3D tiskárně, jež nanáší první vrstvu materiálu na podložku. Velmi podobně nanáší Voltera vrstvu pasty na nosnou podložku. [13]

5.1. Popis zařízení Voltera V-One



Obrázek 1: Voltera V-One [14]

Tisková plocha Voltery je 4,5" x 5" tedy 11,43 x 12,7 cm. Na této ploše jsou od výrobce připraveny upínací prvky, které slouží k upevnění nosné nevodivé podložky po celou dobu používání zařízení. [11]

Na rameni je umístěno nosné zařízení, jež pomocí čtyř malých magnetů drží jeden z nástrojů – vrták, dávkovač pasty nebo sondu. Magnet je dostatečně silný, aby zajistil přesnou manipulaci s danou násadou. Zároveň je ale možné nástavce vyměnit pouhou rukou. [11]

Vrták slouží k propojení oboustranných desek plošných spojů. Vrtákem otáčí bezkartáčový stejnosměrný motor, jehož maximální rychlost otáčení je 11 000 ot/min. [11]

Dávkořač umožňuje nanést vrstvu pasty na podložku. Průtok dávkovače je možné regulovat ručně nebo pomocí softwaru Voltery. Otáčivým pohybem šroubem vyjíždí nebo zajíždí píst, který tlačí na pastu v tubičce. V případě potřeby většího průtoku píst více zatlačí a pasta je více vytlačována ven a opačně. [11]

Sonda slouží k zjištění výškového profilu podložky. Díky tomu se přístroj vyvaruje nechtěnému poškození trysky dávkovače, vrtáku nebo přímo i podložce. [11]

Ve Volteře je vestavěná pírka, tudíž samotné zařízení umožňuje provést finální vytvrzení výrobku. Maximální teplotu, jež je vyhřívací plošina schopna dosáhnout je 240 °C. Na začátku výrobního procesu volíme na počítači z nabídky past v ovládacím programu Voltery tu, kterou budeme používat. Voltera pak sama ví, jaké teplotní rozmezí má pro danou konkrétní pastu nastavit a udržovat. [11]

Regulace teploty probíhá následovně. Když je překročena horní mez, pírka přestane topit, při poklesu pod spodní mez začne Voltera plošinku zase přehřívát. Teplota tedy není konstantní, ale střídavě roste a klesá. Voltera také poskytuje ruční režim, ve kterém můžeme přímo řídit teplotu a tím si vytvořit vlastní profil vytvrzování.

Na obrázku 2 můžeme vidět velmi strmý lineární nárůst teploty pírky. Následně je teplota udržována v tolerančním pásmu kolem požadované hodnoty 210 °C.



Obrázek 2: závislost teploty na čase – začátek vytvrzování

Na Obrázku 3 vidíme pozvolný exponenciální pokles teploty píčky v závislosti na čase. Na začátku křivka teploty klesá rychle, ke konci pomaleji. Pokles je prováděn ve dvou stupních – nejprve z požadované teploty v tomto případě 210 °C na 60 °C a poté teprve na teplotu okolí.



Obrázek 3 - závislost teploty na čase – konec vytvrzování

Doba výroby je přímo úměrná délce a tloušťce nanášené vrstvy. Dále také záleží na složitosti cesty, kterou chceme vytvořit. Obvyklá doba nanášení pasty se pohybuje v řádech minut až desítek minut, doba vytvrzení se pohybuje v desítkách minut. Celkově je tedy možné vytvořit celý výrobek do jedné hodiny. [11]

5.2. Práce na zařízení Voltera V-One

Postup výroby tištěné vrstvy na Volteře se dá popsat v několika následujících krocích:

1. Vytvoření návrhu v návrhovém programu EAGLE od společnosti Autodesk.
2. V programu Voltera byl načten vytvořený motiv z přechozího kroku.
3. Deska je umístěna a upevněna pomocí upínacích držáků do tisknutelné oblasti.
4. Do nosného systému je vložena sonda a po stisknutí tlačítka „Outline“, tiskárna naznačí oblast tisku. V softwaru Voltery je možné posunout motiv, čímž je zajištěno, že se motiv natiskne na správné místo.
5. Po stisknutí „Probe“ proběhne mapování v ose z ve vybraných důležitých bodech. Pomocí sondy zkontroluje Voltera výškovou mapu povrchu destičky. Program sám vyhodnotí, jestli je možné zahájit tisknutí. V případě možné kolize program neumožní další postup. Je tedy potřeba buďto upravit motiv nebo posunout desku. Poté se musí opětovně spustit Probe.

6. Před umístěním zásobníku s pastou do nosného systému se musí zkontrolovat, zdali je pasta správně natlakovaná. Dále je potřeba zkontrolovat, že je tryska čistá a rovná.
7. Probíhá kalibrace výtlačku pasty přes trysku. Program natiskne několik rovných a několik vlnkovitých čar. Na základě natisknutého motivu se musíme rozhodnout, zdali zvýšit, snížit či ponechat beze změny tlak působící na píst. V případě, kdy se vlnky nebo jednotlivé rovné cesty spojí je potřeba tlak zmenšit a tím i zmenšit průtok pasty dávkovačem. V případě, kdy jsou nanášené cesty nespojené, je naopak potřeba tlak na píst zvětšit. Správné zvolení průtoku pasty je zásadní pro úspěšné natištění motivu na nosnou desku.
8. Desku vyndáme z upevnění v prostoru tisku, očistíme isopropanolem od natisknuté pasty z kalibračního kroku a znovu umístíme do oblasti tisku a upevníme, aby se během tisku nepohnula.
9. V této fázi proběhne tisk pasty na desku. V případě potřeby je některé nepovedené části možné očistit a natisknout znovu.
10. Deska se otočí natisknutým motivem směrem k topné desce a začne fáze vytvrzení motivu.
11. Po uplynutí doby potřebné k vytvrzení motivu je výrobek vyndán. Po vychlazení se podrobí výrobek kontrole kvality. Kontrola kvality probíhala stejně jako u výrobků ze sítotisku a je podrobněji vysvětlena v samostatné kapitole viz níže. [3], [13]

5.3. Konkrétní popis použité pasty

K výrobě tlustých vrstev pomocí zařízení Voltera v této práci bylo použito stříbrné vodivé pasty Conductor 2 Lot: TrickyTanuki. Funkční složkou je stejně jako u předešlé pasty také stříbro. Vytvrzení se provádí při 210 °C po dobu alespoň 30 minut. Typický odpor na čtverec (Viz kapitola 6.) nanesené vrstvy výšky $h = 50 \mu\text{m}$ je 2,05 m Ω . [8]

6. Kontrola kvality

Kontrola kvality se provádí několika různými způsoby v závislosti na typu spoje a specifikaci výrobku. Metody, které jsem použil v této práci jsou následující:

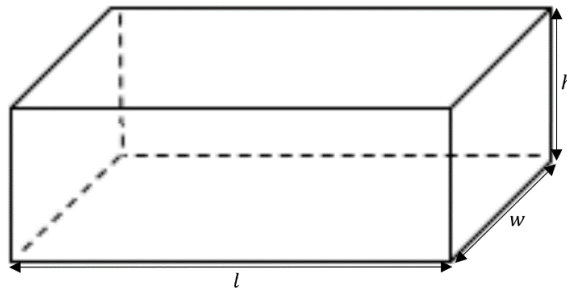
Vizuální zkoumání – tato metoda spočívá ve zkoumání nanesené tlusté vrstvy očima. U některých nepovedených výrobků je na první pohled zřejmé, že spoj bude potřeba vytvořit znovu. Například z důvodu, že se jednotlivá cesta sama se sebou nespojila. K tomu mohlo dojít z důvodu nedostatečného množství nanesené pasty (ucpaná tryska, špatná adheze, nedostatečně veliký průtok dávkovačem, aj.) nebo degradací pasty. Úpadek pasty může být způsoben buďto expirací nebo špatným skladováním – pasta zhrudkovatěla, zaschla v trysce aj. Dalším nepovedeným případem je spojení dvou různých cest do sebe z důvodu nanesení příliš velkého množství pasty. Poté co výrobek úspěšně prošel touto kontrolou, byl podroben teprve dalšímu podrobnějšímu zkoumání.

Kontrola elektrických vlastností – tato metoda vychází z měření elektrických vlastností cesty. V této práci jsem se zaměřil pouze na měření odporu, jež jsem měřil pomocí multimetru Mastech MY 75. Měření bylo prováděno opakovaně – třikrát pro každou cestu. Výsledná hodnota je určena jako průměr těchto naměřených hodnot.

Elektrický odpor je dán následujícím vztahem:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1)$$

Kde ρ je rezistivita (Ωm), l je délka vodiče (m) a S je obsah kolmému průřezu vodičem (m^2).
[12]



Obrázek 4: popis rozměrů tlusté vrstvy

V tomto případě je plocha kolmého průřezu vodičem – tlusté vrstvy rovna přibližně obsahu obdélníku:

$$S = w \cdot h \quad (2)$$

w je šířka tlusté vrstvy (m) a h je její průměrná výška (m). Tudíž je možné napsat vztah pro výpočet elektrického odporu následovně:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot h} \quad (3)$$

Změřený odpor lze přepočítat na tzv. „odpor na čtverec“ pomocí následujícího vzorce:

$$R = R_{\square} \cdot n = R_{\square} \cdot \frac{l}{w} \quad (4)$$

$$R_{\square} = \frac{R \cdot w}{l} = \frac{R}{n} \quad (5)$$

Kde R je celkový odpor (Ω), R_{\square} je odpor na čtverec (Ω), n je počet čtverců tvořící vodivou cestu (-), l je délka vodivé cesty (m) a w je šířka vodivé cesty (m). [13]

Odpor na čtverec představuje velikost odporu vrstvy čtvercového tvaru (šířka vrstvy w je rovna délce l). Tato hodnota je stanovena pro danou tloušťku t , kterou bude mít vrstva při provedení technologického postupu dle nastavených podmínek. [13]

Z uvedených rovnic vychází následující předpoklady:

- S rostoucí délkou se bude zvyšovat odpor. S rostoucí plochou kolmého průřezu tlusté vrstvy se bude odpor zmenšovat.
- Dosazením rovnice 3 do 5 a úpravou získáme vztah:

$$R_{\square} = \frac{\rho}{h} \quad (6)$$

Z této rovnice je vidět, že velikost odporu na čtverec je závislá pouze na rezistivitě (dána zvolenou pastou) a výšce tlusté vrstvy, nikoli na její délce a šířce.

Měření výškového profilu – toto měření bylo provedeno na přístroji Form Talysurf Intra. Toto zařízení se používá k měření rozměrů, tvaru, zakřivení a drsnosti povrchu a hodnotí tyto parametry pouze z jednoho měření profilu povrchu. [9]



Obrázek 5: Form Talysurf Intra [10]

Form Talysurf Intra je hrotová metoda, která je založená na snímání vertikálního pohybu hrotu po povrchu vzorku. Raménko s diamantovým hrotem posuvným pohybem přejíždí po povrchu vzorku, který je umístěn na univerzálním pracovním stolku, jež umožňuje seřizování ve směrech os x, y, z. Indukční snímač polohy převádí aktuální výšku hrotu nad vzorkem na elektrický signál, který je dále vyhodnocen počítačem. Naměřená data byla zpracována pomocí programu Taly Profile Gold. [9]

Mikroskopická prozkoumání – bylo provedeno na optickém mikroskopu Vision Engineering HAWK DYNASCOPE.



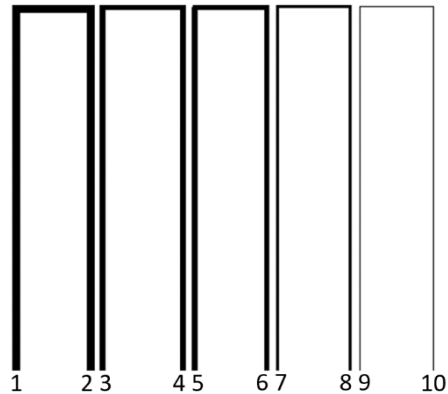
Obrázek 6: mikroskop Vision Engineering

7. Motivy cest

V této práci jsem pracoval se třemi různými motivy, které jsem vyrobil pomocí obou výrobních metod – sítotisk a Voltera.

- **Motiv č. 1:**

Všechny cesty jsou stejně dlouhé $l = 41$ mm, liší se pouze svou šířkou.



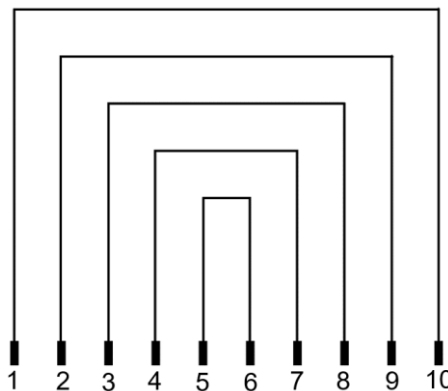
Obrázek 7: Motiv č. 1

cesta	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10
w (mm)	1,5	1	0,8	0,5	0,3

Tabulka 1: určení parametrů cest motivu č. 1

- **Motiv č. 2:**

Všechny cesty jsou stejně široké $w = 1$ mm, liší se svou délkou.



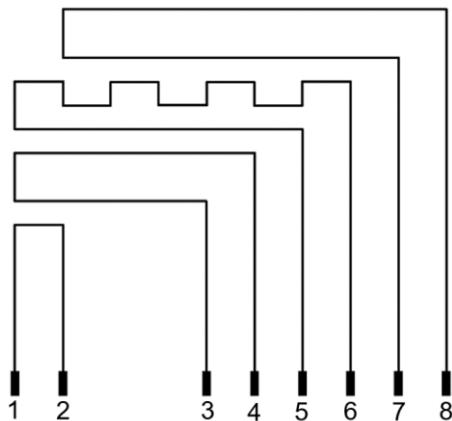
Obrázek 8: Motiv č. 2

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

Tabulka 2: určení parametrů cest motivu č. 2

- **Motiv č. 3:**

Všechny cesty jsou stejně široké $w = 1$ mm, liší se svou délkou a tvarem.



Obrázek 9: Motiv č. 3

dráha	1-2	3-4	5-6	7-8
l (mm)	10	40,5	61,5	76,5

Tabulka 3: určení parametrů cest motivu č. 3

8. Analýza naměřených hodnot

V této kapitole vyhodnotím a srovnám naměřené hodnoty a vlastnosti vyrobených vzorků podle metod uvedených v kapitole 6 – Kontrola kvality. Pro každý motiv jsem vyrobil tři vzorky pomocí sítotisku a tři pomocí Voltery.

8.1. Elektrické vlastnosti

8.1.1. Motiv č. 1

w (mm)	sítotisk	Voltera	sítotisk	Voltera	sítotisk	Voltera
	R (Ω)	R (Ω)	R_{\square} (Ω)	R_{\square} (Ω)	$R_{\square 10}$ (Ω)	$R_{\square 10}$ (Ω)
0,3	nezměřitelné					
0,5	8,22	6,56	0,40	0,320	0,26	0,64
0,8	5,19	2,10	0,16	0,064	0,10	0,13
1	4,47	1,09	0,11	0,027	0,07	0,05
1,5	3,68	0,91	0,06	0,015	0,04	0,03

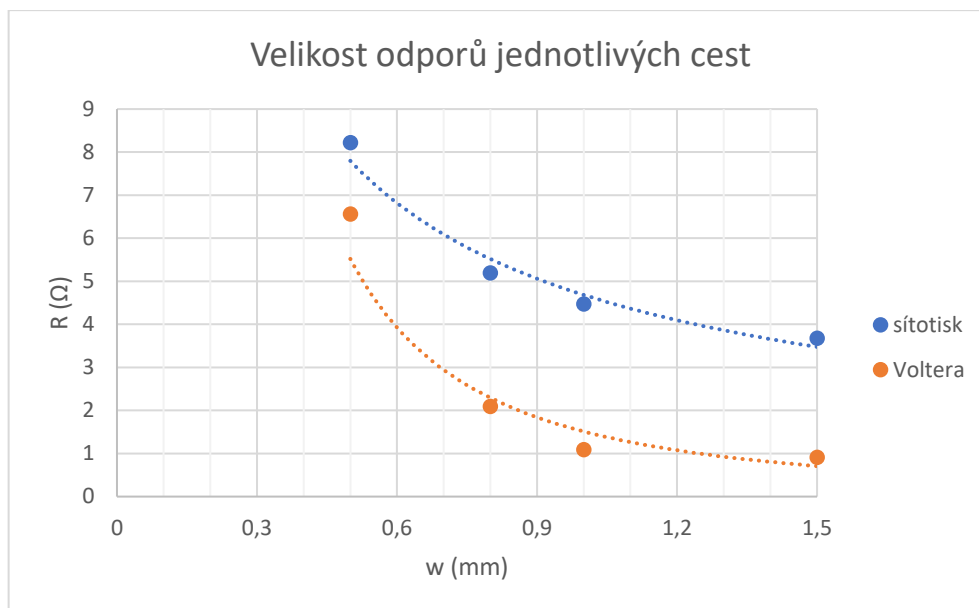
Tabulka 4: Velikost odporů jednotlivých cest motivu č. 1

Hodnota $R_{\square 10}$ je velikost odporu na čtverec přepočtená na výšku $h = 10 \mu\text{m}$, sloužící k porovnání vrstev rozdílné výšky u sítotisku a Voltery. Vypočítá se podle následujícího vztahu:

$$R_{\square 10} = R_{\square} \cdot \frac{h}{10} = 0,4 \cdot \frac{6,5}{10} \cong 0,26 \Omega$$

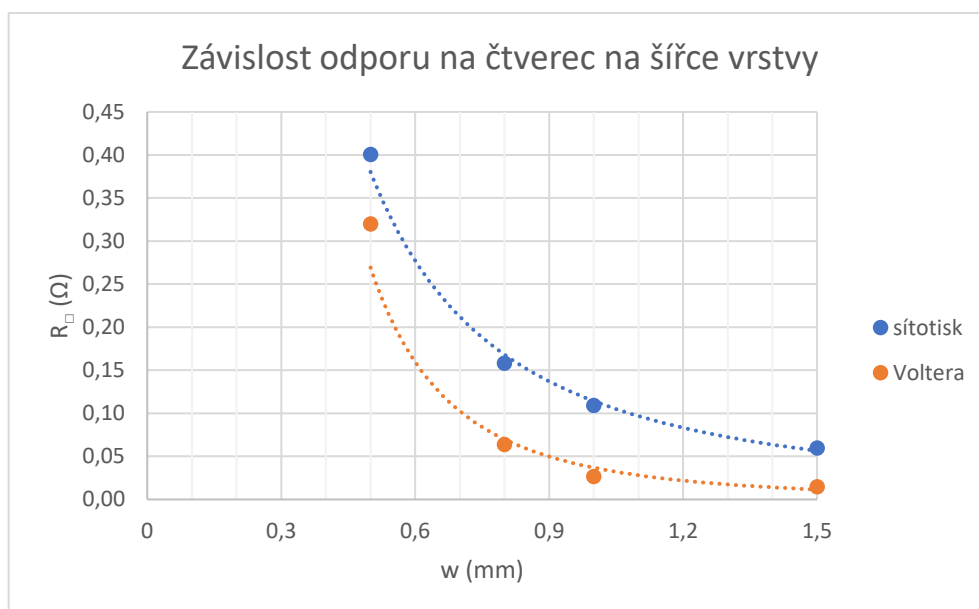
h je tloušťka vrstvy (μm), hodnoty h převzaty z tabulky 7.

Cesty šířky 0,3 mm se nespojili po celé délce. Nanesené pasta vytvořila sérii několika izolovaných ostrůvků, jež jsou podrobněji znázorněny a popsány na obrázcích 23 a 24.



Obrázek 10: Porovnání velikosti odporů jednotlivých cest motivu č. 1

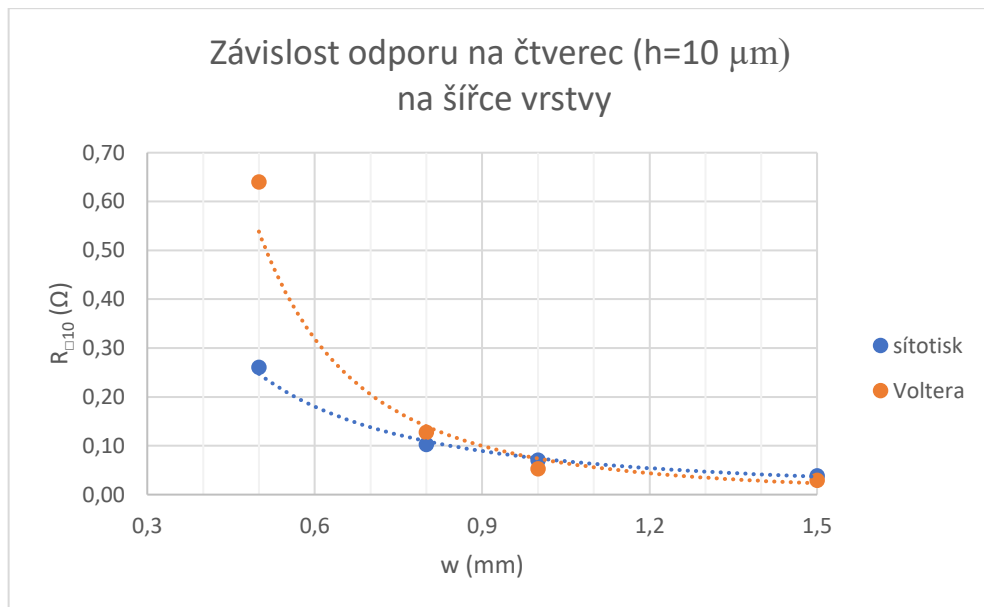
Rozdílné hodnoty odporů cest vyrobených sítotiskem a Volterou jsou dány hlavně rozdílnou výškou nanesené vrstvy ale i samotnými vlastnostmi konkrétních použitých past. Průměrná výška sítotiskové vrstvy je $h_s = 6,5 \mu\text{m}$, zatímco výška vrstvy nanesené pomocí voltery vychází zhruba na $h_v = 30 \mu\text{m}$. Na obr. 9 můžeme vidět, jak s rostoucí šířkou hyperbolicky klesá velikost odporu, přesně jak předpokládáme z rovnice 7.



Obrázek 11: Porovnání odporů na čtverec v závislosti na šířce vrstvy

Z rovnice 10 vychází, že odpor na čtverec není závislý na šířce. Jak je na obr. 9 ale vidět, není tento předpoklad splněn. To je dáno větším dopadem případné chyby při nanášení pasty pro užší cesty. Například pro sítotisk: Je-li ucpané jedno oko síta z osmi

je to procentuálně více, než když u širší cesty je ucpané jedno z patnácti. Taková chyba se projeví větším nárůstem odporu u užších cest než u širších. Pro Volteru platí podobné odůvodnění. Je-li přerušen jeden táhlý pohyb a dalších osm nebo patnáct je v pořádku, bude i procentuální dopad nárůstu odporu rozdílně veliký. Proto odpor na čtverec klesá se zvyšující se šířkou. Úplně stejně to platí i pro přepočtené odpory na čtverec $h = 10 \mu\text{m}$, viz obrázek 10.



Obrázek 12: porovnání odporů na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) v závislosti na šířce vrstvy

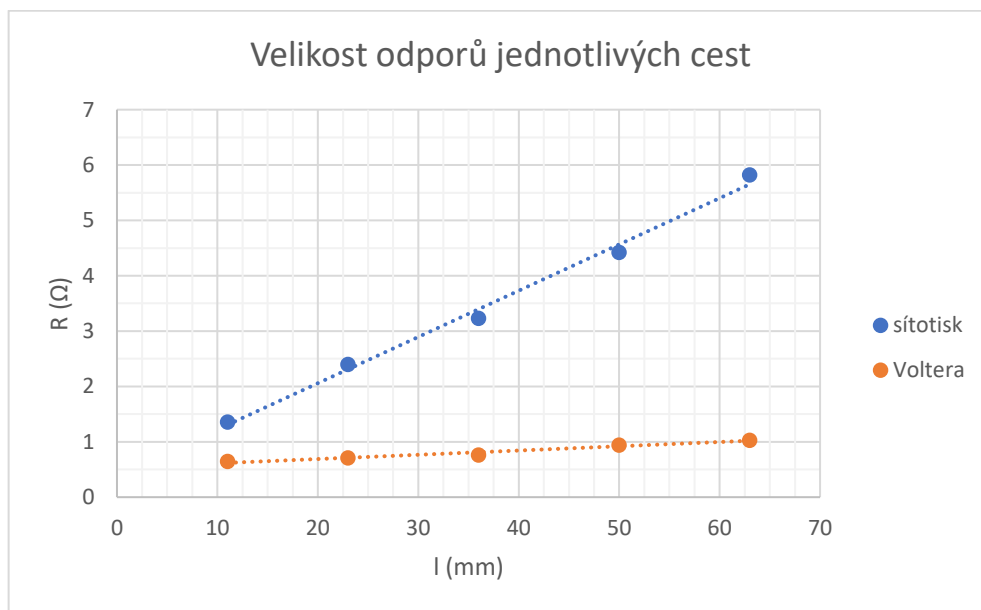
Po přepočtení odporů na čtverec na vztažnou výšku $h = 10 \mu\text{m}$ můžeme vidět velmi obdobné hodnoty jak pro sítotisk, tak pro Volteru u cest širokých $w \geq 0,8 \text{ mm}$. Pasty vykazují velmi podobné vodivé vlastnosti. Charakteristiky pro šířky $w \geq 0,8 \text{ mm}$ nevykazují tak velikou závislost na šířce vrstvy. Vypočtené hodnoty už se liší jen o několik jednotek $\text{m}\Omega$. Pouze pro nejužší cesty o šířce $w = 0,5 \text{ mm}$ vychází odpor na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) podstatně větší. To je způsobeno větším dopadem chybovosti, tak jak to bylo popsáno v předchozím odstavci. Dále vidíme, že sítotisk vykazuje podstatně menší závislost na šířce oproti Volteře. To znamená, že sítotisková metoda je méně chybová.

8.1.2. Motiv č. 2

l (mm)	sítotisk	Voltera	sítotisk	Voltera	sítotisk	Voltera
	R (Ω)	R (Ω)	R_{\square} (Ω)	R_{\square} (Ω)	$R_{\square 10}$ (Ω)	$R_{\square 10}$ (Ω)
11	1,36	0,64	0,12	0,06	0,080	0,263
23	2,4	0,71	0,10	0,03	0,068	0,139
36	3,23	0,76	0,09	0,02	0,058	0,095
50	4,42	0,94	0,09	0,02	0,057	0,085
63	5,82	1,03	0,09	0,02	0,060	0,074

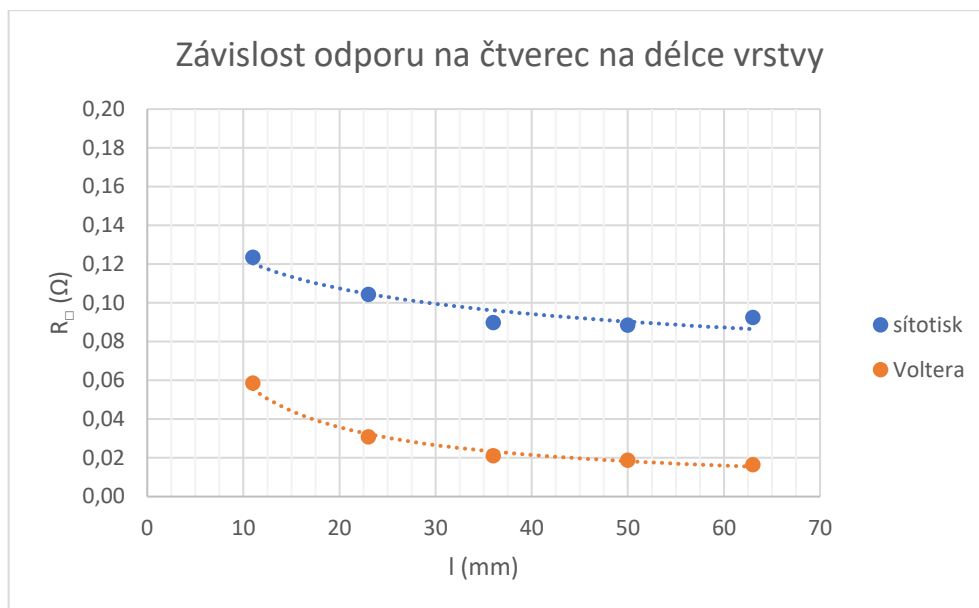
Tabulka 5: Velikost odporů jednotlivých cest motivu č. 2

Všechny cesty jsou široké $w = 1$ mm a tak nebyl problém s nanášením plně vodivých vrstev jako tomu bylo u motivu č. 1.



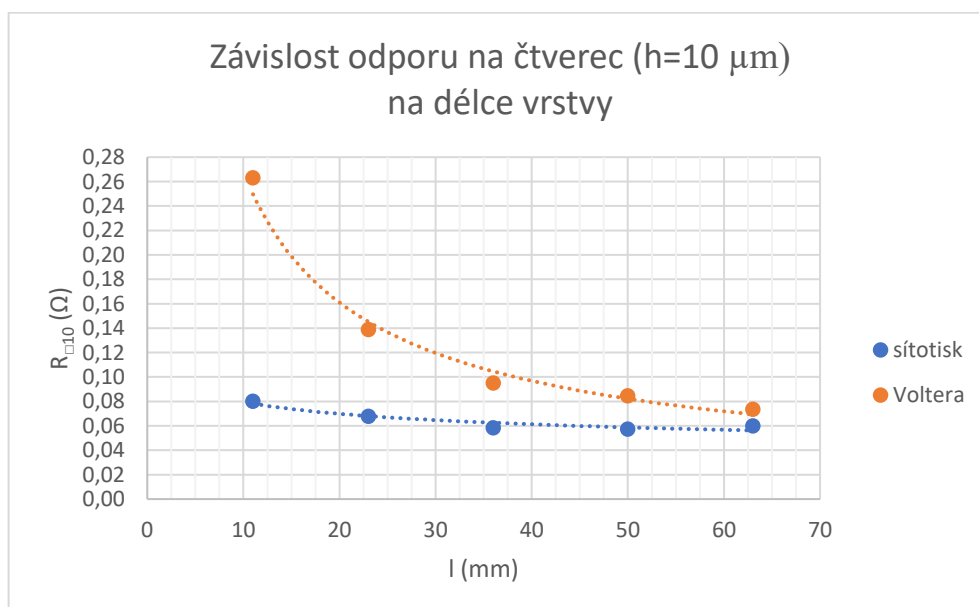
Obrázek 13: Porovnání velikosti odporů jednotlivých cest motivu č. 2

Hlavním faktorem velkého rozdílu velikosti odporů mezi sítotiskem a Volterou je zase výška nanášených vrstev. Vodivé cesty vytvořené pomocí Voltery jsou výrazně vyšší, $h_V = 45 \mu\text{m}$, než ty pomocí sítotisku, $h_S = 6,5 \mu\text{m}$. Proto i v tomto případě jsem pro lepší porovnání přepočtl všechny výšky na stejnou vztáhnou hodnotu $h = 10 \mu\text{m}$. S rostoucí délkou cest můžeme pozorovat lineární nárůst odporu, tak jak předpokládáme z rovnice 7.



Obrázek 14: Porovnání odporů na čtverec v závislosti na délce vrstvy

Z teoretického předpokladu vychází, že odpor na čtverec je nezávislý na délce vrstvy. Jak ale na tomto obrázku vidíme, charakteristiky vykazují jistou závislost. To je dáno tím, že celkový odpor se skládá z odporu vrstvy a z kontaktního odporu. U krátkých cest s menším počtem čtverců se v přepočtu na odpor na čtverec více projeví kontaktní odpor. Sítotisk má větší odpor na čtverec z důvodu podstatně většího odporu, jež je způsoben menší výškou vrstvy oproti Volteře.



Obrázek 15: porovnání odporů na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) v závislosti na šířce vrstvy

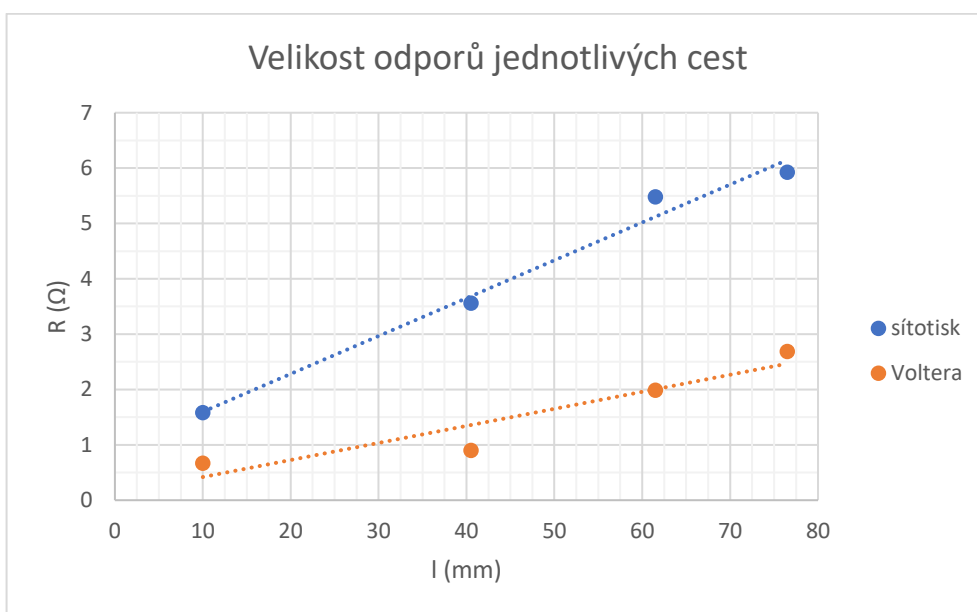
Po přepočtení na jednotnou výšku $h = 10 \mu\text{m}$ vidíme na obrázku 15, že vrstvy nanesené pomocí sítotisku vykazují lepší vodivé vlastnosti – mají menší odpor na čtverec. Také vrstvy ze sítotisku vykazují menší závislost na délce vrstvy, což je dáno menší chybovostí této metody.

8.1.3. Motiv č. 3

l (mm)	sítotisk	Voltera	sítotisk	Voltera	sítotisk	Voltera
	R (Ω)	R (Ω)	R_{\square} (Ω)	R_{\square} (Ω)	$R_{\square 10}$ (Ω)	$R_{\square 10}$ (Ω)
10	1,58	0,67	0,16	0,07	0,103	0,201
40,5	3,56	0,9	0,09	0,02	0,057	0,067
61,5	5,48	1,99	0,09	0,03	0,058	0,097
76,5	5,92	2,69	0,08	0,04	0,050	0,105

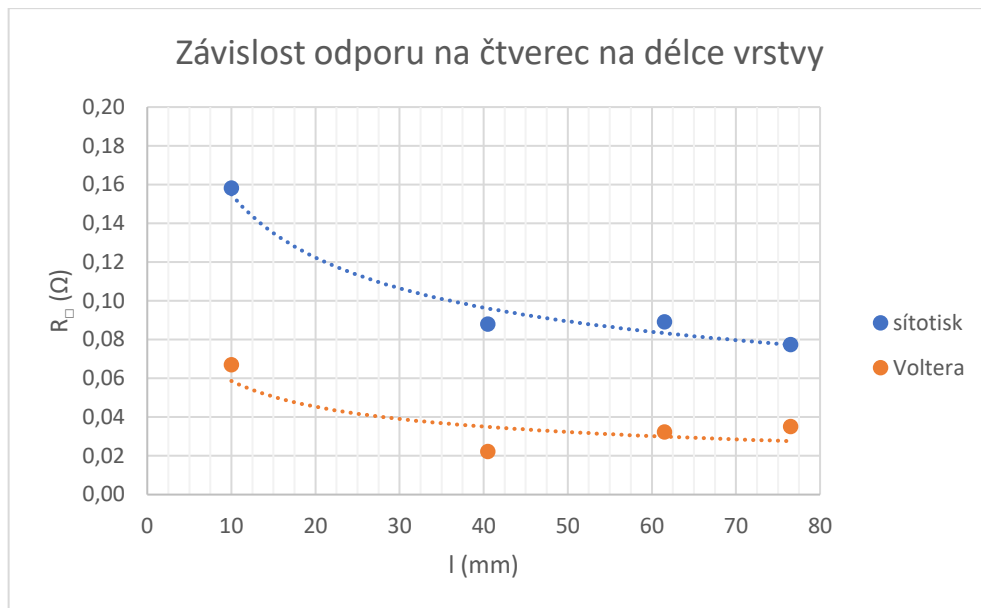
Tabulka 6: Velikost odporů jednotlivých cest motivu č. 3

Všechny cesty jsou široké $w = 1 \text{ mm}$ a tak nebyl problém s nanesením plně vodivých vrstev tak, jak tomu bylo u motivu č. 1.



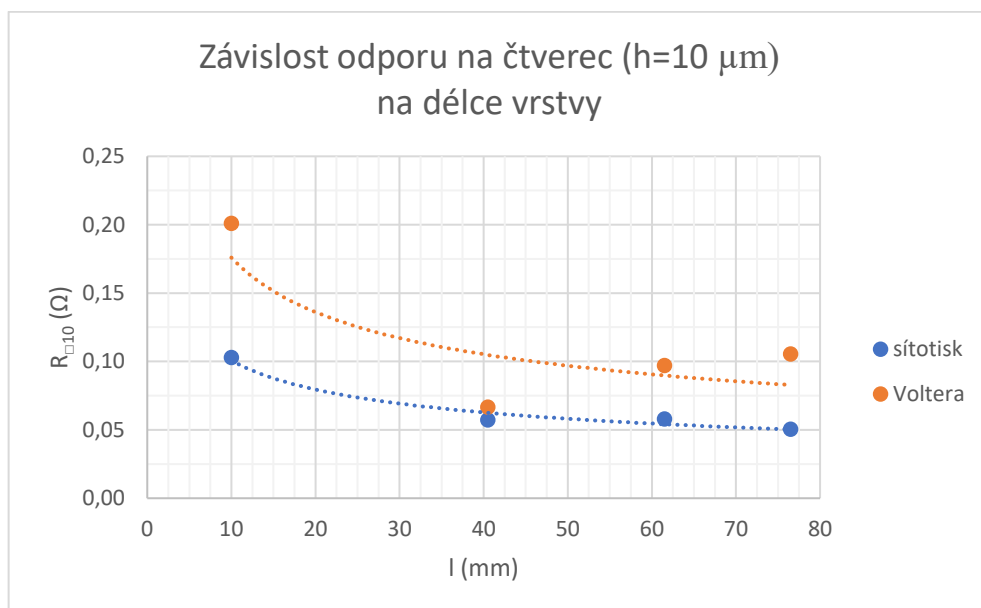
Obrázek 16: Porovnání velikosti odporů jednotlivých cest motivu č. 3

Hodnoty odporů lineárně stoupají s rostoucí délkou vodivých cest. Při porovnání s obrázkem 11 vidíme výrazně větší velikosti odporů cest vyrobených pomocí Voltery. U motivu č. 2 má cesta délky $l = 63 \text{ mm}$ odpor o hodnotě $R = 1,03 \Omega$ zatímco u motivu č. 3 má cesta o délce $l = 61,5 \text{ mm}$ skoro dvojnásobně veliký odpor $R = 1,99 \Omega$. Tento rozdíl je způsoben nekonzistentní výškou vrstev, jež Voltera produkuje. U motivu č. 2 je průměrná výška vrstvy $h = 45 \mu\text{m}$ zatímco u motivu č. 3 je výška $h = 30 \mu\text{m}$, u motivu č. 1 pak dokonce jen $h = 20 \mu\text{m}$.



Obrázek 17: Porovnání odporů na čtverec v závislosti na délce vrstvy

Z rovnice 10 vychází, že odpor na čtverec je nezávislý na délce cesty. Na obr. 15 ale vidíme, jak odpor na čtverec s rostoucí délkou cest klesá. Důvod je stejný jako u motivu č. 2. U kratších cest se více uplatní vliv kontaktního odporu.

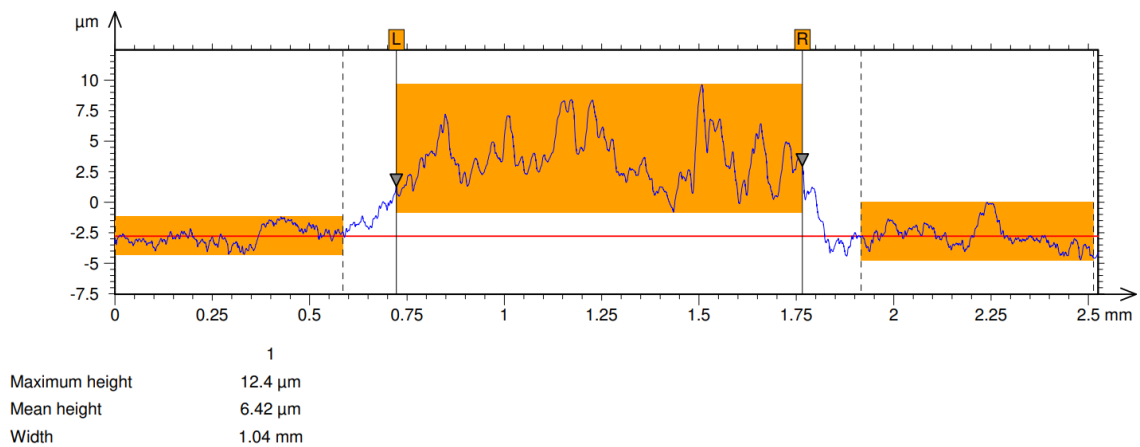


Obrázek 18: porovnání odporů na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) v závislosti na šířce vrstvy

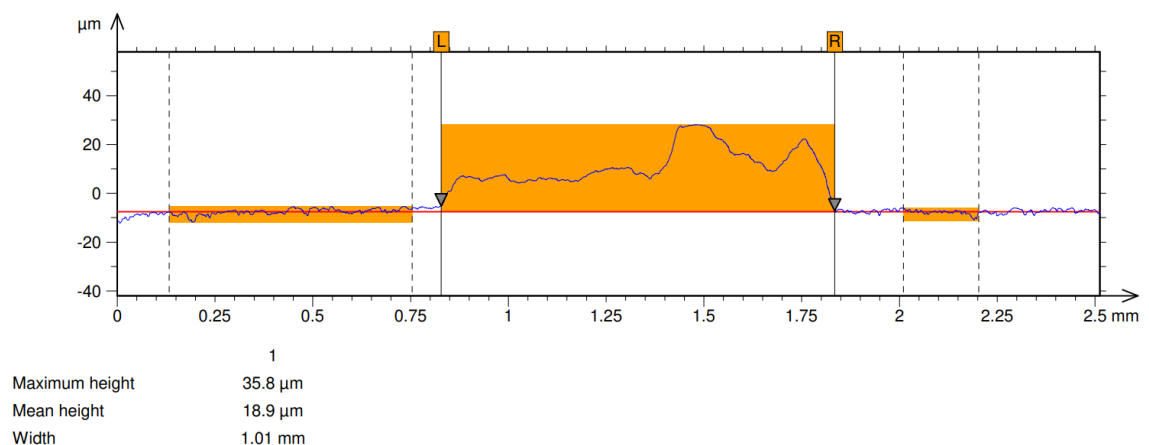
Vrstvy vyrobené pomocí sítotisku znovu vykazují lepší vodivé vlastnosti – menší odpor na čtverec, a menší závislost na délce cesty – menší chybovost. Voltera nezvládá tak přesně vykreslit zakřivení cest ve srovnání se sítotiskem. Viz obrázky 21 a 28.

8.2. Výškové profily

Na nanosených vrstvách je vidět velká rozdílnost výšek. Tato rozdílnost (Někdy se dokonce jedná o chybovost.) se projeví více u cest menších objemů, kde jednotlivé výkyvy daleko zásadněji ovlivní velikost výsledného odporu. Tento jev můžeme pozorovat na velikostech odporů jednotlivých cest. Kdy po znázornění vypočteného odporu na čtverec v závislosti na délce nebo šířce vrstvy, můžeme sledovat, jak s rostoucí délkou nebo šířkou klesá odpor na čtverec a charakteristika postupně vykazuje menší závislost. Dalo by se tedy říci, že u širších a delších vrstev se chybovost více zprůměruje a „ztratí“.



Obrázek 19: výškový profil motiva č.1 (sítotisk, $w = 0,5$ mm)



Obrázek 20: výškový profil motiva č.1 (Voltera, $w = 1$ mm)

průměrná výška vrstev		
motiv č.	sítotisk	Voltera
	h (μm)	h (μm)
1	6,5	20
2		45
3		30

Tabulka 7: průměrné naměřené výšky vrstev

Průměrné naměřené výšky vrstev byly použity k výpočtu odporů na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) jednotlivých motivů.

Pomocí následujících výpočtů můžeme porovnat odpor na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) vyrobených vrstev s hodnotou danou od výrobce, jež byly uvedeny v podkapitolách Konkrétní popis použité pasty.

$$R_{\square 10} = R_{\square \min} \cdot \frac{h}{10} = 0,015 \cdot \frac{25,4}{10} \cong 0,04 \Omega$$

$$R_{\square 10} = R_{\square \max} \cdot \frac{h}{10} = 0,05 \cdot \frac{25,4}{10} \cong 0,13 \Omega$$

Pro sítotisk by se tedy velikost odporu na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) měla pohybovat v rozmezí 0,04-0,13 Ω .

$$R_{\square 10} = R_{\square} \cdot \frac{h}{10} = 0,00205 \cdot \frac{50}{10} \cong 0,01 \Omega$$

Pro Volteru velikost odporu na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) vychází $R_{\square 10} \cong 0,01 \Omega$.

Většina hodnot odporů na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) tištěných vrstev vyrobených sítotiskem, odpovídá předpokládaným hodnotám od výrobce. Jedinou výjimkou je cesta 7-8 šířky $w = 0,5 \text{ mm}$ motivu č. 1, kde vychází $R_{\square 10} = 0,26 \Omega$. Tato větší hodnota odporu na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) je dána chybovostí. U této úzké cesty vychází zhruba tři oka síta na šířku. Tudíž dopad chybovosti je velký.

U Voltery vychází všechny hodnoty odporů na čtverec ($h = 10 \mu\text{m}$) větší, než jaké uvádí výrobce. Důvodem je vysoká chybovost výrobní metody Voltery.

8.3. Mikroskopické zkoumání



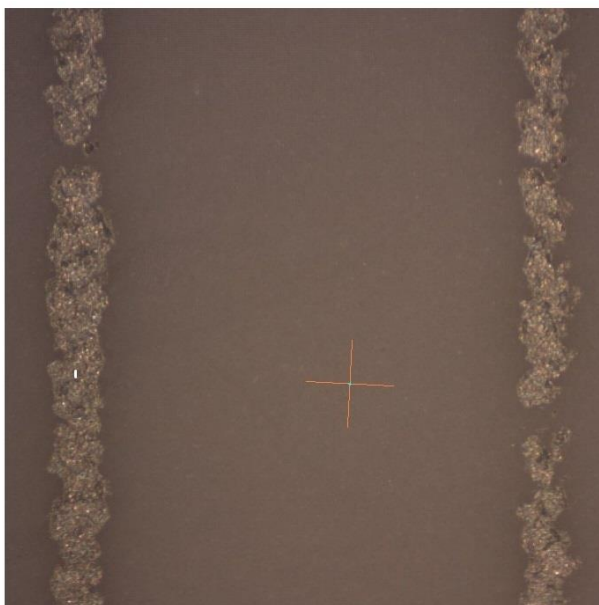
Obrázek 21: typický profil vrstvy nanesené sítotiskem

Na tomto obrázku můžeme pozorovat typický profil vrstvy o šířce $w = 1$ mm nanesené sítotiskem. Vrstva má mřížkovitě umístěná svá výšková maxima a minima. V místě, kde je více pasty bylo oko síta a tam, kde je pasty méně bylo vlákno. Dále můžeme pozorovat, že vlákna síta byla vedena diagonálně vůči okrajům nanesené vrstvy. V této práci jsem použil síto s 65 oky na centimetr tedy zhruba 6 ok na milimetr.



Obrázek 22: typický profil vrstvy nanesené Volterrou

Na obrázku 22 můžeme sledovat typický způsob, jímž Voltera nanáší pastu – dlouhé táhlé rovné cesty, které se spojí paralelně do sebe. Dále také můžeme pozorovat, jak v některých částech byl průtok pasty větší než v jiných, což způsobilo rozdílnou výšku výsledných vrstev.



Obrázek 23: nespojená cesta 9-10 motivu č. 1 - sítotisk

Na tomto obrázku je vidět cesta, která pouhému oku připadá jako spojená. Při bližším pohledu pod mikroskopem je ale jasně vidět, že spojená v žádném případě není. Příčinou jsou ucpaná oka síta, kvůli kterým se pasta neprotlačila skrz. Tato cesta je široká $w = 0,3$ mm z toho vyplývá že na šířku vrstvy vychází 2-3 oka. Čím je cesta užší, tím má menší počet ok na šířku a tím je šance na nespojení větší.



Obrázek 24: nespojená cesta 9-10 motivu č. 1 – Voltera

Tato cesta by se také pouhým okem zdála spojitá, až pod mikroskopem jsou vidět důvody, proč nanesená vrstva neplní svou vodivou úlohu. Zvolený průtok pasty tryskou byl nedostačující.



Obrázek 25: občasná ucpaná oka – sítotisk

V tomto případě bylo také několik ok síta ucpaných. Vodivost ale nebyla přerušena. Pouze bude vrstva v některých místech více namáhána a zahřívána z důvodu větší proudové hustoty.



Obrázek 26: málo nanesené pasty – Voltera

Na první pohled by se mohla tato nanesená vrstva zdát v pořádku. Ovšem už při pokusu o změření velikosti odporu dojdeme k zjištění, že daná vrstva není vodivá. Je tomu tak z důvodu nedostatečného množství nanesené pasty, což vede k nespojení vodivé vrstvy. Cesta je pak tvořena nespojitými ostrůvky, jak je možné vidět na obr. 27.



Obrázek 27: detail obrázku 26



Obrázek 28: zakřivení cest motivu č. 3 – Voltera

Zde vidíme, jak Voltera nezvládá vykreslovat motiv, tak přesně jako to umí sítotisk, viz obrázek 21. Na místo pravých úhlů má cesta zaoblené rohy. Také zde vidíme další anomálii, jež Voltera občas provede. Dávkovač nepřestane vytlačovat pastu po dokončení cesty a při svém přesunu na další místo nanáší pastu kam nemá.

9. Porovnání technologií sítotisku a Voltery

V této kapitole bych rád shrnul několik rozdílů uvedených výrobních metod tištěných vodivých vrstev. Sítotisk těrkou protlačuje pastu skrze sítku na destičku. Zatímco Voltera nanáší pastu na destičky pomocí speciálního dávkovače.

Doba, kterou trvá vyrobit zcela hotové destičky pomocí sítotisku, vychází zhruba na jednu hodinu. Půlku tohoto času ale zabere samotné vytvrzení výrobku. Další podstatnou část zabere příprava zařízení, kdy se provádí sesazení síta a potiskovaných destiček, dále pak také čištění těrky a síta před i po použití sítotisku. Samotné nanášení pasty na destičky je otázka maximálně několika minut.

Doba, kterou trvá udělat zcela hotovou destičku pomocí Voltery, vychází také zhruba na jednu hodinu. Proměření destičky v ose z pomocí sondy trvá obvykle dvě minuty. Kalibrace průtoku pasty a očištění destičky zabere další tři minuty. Samotné nanášení pasty na destičku proběhne během 3-5 minut. Nejdéle probíhá zase samotné vytvrzení výrobků (30+ minut).

Může se tedy zdát, že obě metody jsou časově zhruba stejně náročné. Není tomu tak. Dle velikosti síta a destiček je možné potiskovat několik destiček najednou. Čas potřebný pro přípravu a čištění zařízení se téměř nemění při různých počtech tisků. Oproti tomu Voltera je svým dávkovačem schopna nanášet pastu vždy jen na jednu destičku najednou. Jediné urychlení, které je u Voltery možné provést, je nanést pastu na pět destiček, což je maximální množství, jež se vejde do vestavěné pícky. Doba přípravy sítotisku před i po použití je delší než u Voltery, ale to je vykompenzováno velkým množstvím destiček, které vyprodukuje během používání.

Méně materiálu k vyrobení jednoho výrobku použije zařízení Voltera. Sítotisk při prvním cyklu nanášení spotřebuje velké množství pasty jejím rozetřením po síťce v místech s ucpanými oky a po těrce. Při výrobě velkého množství destiček je ale vyšší prvotní spotřeba materiálu vykompenzována téměř nulovou chybovostí, a proto se v tomto případě více vyplatí sítotisk. Poměr spotřebované pasty k množství nanesené pasty na destičkách je pro malý počet tisků vyšší než u Voltery. Se zvyšujícím se počtem natištěných destiček se postupně poměr snižuje. Množství „odpadní“ pasty (tj. pasty, která zůstane na sítu a na těrce) zvyšuje jen nevýrazně se stoupajícím počtem tiskových cyklů.

Pokud má síťotisk čistou síťku, nedopouští se tato výrobní metoda téměř žádných chyb. Oproti tomu Voltera je během svého procesu nanášení schopna kdykoli udělat chybu. Nejčastěji nastává problém z důvodu špatného vytlačovaného množství pasty dávkovačem. Občas nanáší zbytečně moc, jindy zas málo. Přibližný poměr povedených výrobků ku nepovedeným mi vycházel zhruba 1:3.

Vrstvy vyrobené síťotiskem mají v průměru téměř konstantní výšku. Výchylka se pohybuje v řádu jednotek mikrometrů. Oproti tomu vrstvy z Voltery mají rozdílnost v řádech desítek mikrometrů. Viz podkapitola 8.2 Výškové profily.

Síťotisk je tedy vhodný pro sériovou výrobu. Pro kusovou výrobu je nevýhodný z hlediska spotřeby pasty při tisku a nákladů na výrobu síta.

10. Závěr

V této práci jsem popsal výrobní technologie sítotisk a Voltera V-One. Obě zařízení se používají k výrobě tištěných vrstev. Sítotisk se používá především v sériové výrobě, jelikož nanášení pasty je jednoduché, přesné a rychlé. Tato metoda ovšem není vhodná pro výrobu prototypů z důvodu potřeby nového síta při každé sebemenší změně na požadovaném nanášeném motivu. Naopak Voltera je na výrobu prvotních vzorků ideální, jelikož motiv lze snadno upravit v návrhovém programu.

Pomocí obou výrobních metod jsem tedy zhotovil tři vzorky pro tři různé motivy. Tyto výrobky jsem porovnal na základě elektrických a optických měření. Z podrobně uvedených a rozebraných výsledků v kapitole 8 Analýza naměřených hodnot jsem došel k následujícím závěrům.

Sítotisk produkuje tištěné vrstvy rychleji a s menší chybovostí než Voltera. Dle dat deklarovaných výrobcem jsem předpokládal, že tištěné vrstvy vyrobené pastou Conductor 2 Lot: TrickyTanuki (Voltera) budou mít menší odpor než vrstvy ze sítotisku, kde byla použita pasta Paron-910. Navzdory tomuto předpokladu vykazují vzorky vyrobené pomocí Voltery větší odpor. Důvodem je velká míra chybovosti této výrobní metody.

Výška vrstev vyrobených pomocí sítotisku se pohybuje v řádu jednotek mikrometrů. Výška vrstev nanesených Volterou vychází v rozmezí 20-50 μm . Vrstvy vyrobené pomocí sítotisku jsou tedy podstatně nižší a jejich výškové profily vykazují menší výkyvy, což je způsobeno chybovostí výrobní metody Voltery. Příčinou této chybovosti byla například ucpaná tryska dávkovače či nedostatečné množství pasty v zásobníku.

Reference

- [1] *Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích* [online]. 2008, **2008**(1), 3 [cit. 2023-09-22]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36505.pdf>
- [2] MACH. *Tlusté vrstvy a tlustovrstvé technologie* [online]. Praha, nevedeno [cit. 2023-09-22]. Prezentace. ČVUT FEL. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/343796/mod_resource/content/1/Tluste_vrstvy_a_tlustovrstve_tehnologie.pdf
- [3] Voltera. *V-One Getting Started with your First Print* [online]. nevedeno [cit. 2023-09-22]. Dostupné z: <https://docs.voltera.io/v-one/getting-started/hello-world-project/3.-getting-started-with-your-first-print>
- [4] ESTERKA, Alois. *Tlusté vrstvy* [online]. nevedeno, 2018 [cit. 2023-09-22]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/68320791-Tlustovrstva-technologie-kompletni-technologicky-proces-pro-vyrobu-hio-navrh-modelovani-a-simulace-technologicky-postup-aplikace.html>
- [5] Pavel MACH, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. [cit. 2023-12-28]. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [6] Matesart. *Matesart* [online]. 2023 [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://www.matesart.cz/blog/emulze/>
- [7] CHANG SUNG CORPORATION. *Conductive Pastes: Materials for a high-tech revolution* [online], cit 2023-12, <https://studylib.net/doc/18291422/conductive-pastes>
- [8] CONDUCTOR 2: Voltera Conductor 2 (1000388). In: *Voltera* [online]. [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://docs.voltera.io/v-one/downloads/technical-data-sheets>
- [9] Form Talysurf Intra. In: ŠEVČÍK, Bohumil. *DOCPLAYER* [online]. [cit. 2023-12-29]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/198937-Form-talysurf-intra-precizni-reseni-mereni-tvaru-a-textury-povrchu.html>
- [10] TAYLOR HOBSON: *FORM TALYSURF INTRA* [online]. In: [cit. 2023-12-29]. Dostupné z: <https://taylorhobson.es/productos/rugosímetros-semiportátiles/14-rugosímetro-semi-portátil-form-talysurf-intra>

- [11] VOLTERA: V-One. In: *Voltera* [online]. [cit. 2023-12-29]. Dostupné z: <https://www.voltera.io/v-one>
- [12] *Fyzika 007* [online]. rok vydání neuvedeno [cit. 2023-12-29]. Dostupné z: <https://www.fyzika007.cz/elekt%C5%99ina-amagnetismus/el-proud-vkovech/elektrick%C3%BD-odpor>
- [13] *TLUSTÉ VRSTVY – VYTVÁŘENÍ PROTOTYPŮ DPS: Technologické procesy pro elektrotechniku – úloha č. 9* [online]. [cit. 2023-12-29]. Návod. ČVUT FEL. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=6664>
- [14] *Voltera V-One: Printer Setup*. In: *Voltera V-One* [online]. 2023 [cit. 2023-12-29]. Dostupné z: <https://docs.voltera.io/v-one/getting-started/hello-world-project/2.-printer-setup>