



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**

**Technologie pro výrobu desek plošných spojů**

**Technology for Printed Circuit Boards Production**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

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

**Jan Kaltmeyer**

**Praha 2018**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kaltmeyer** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **457240**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Technologie pro výrobu desek plošných spojů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Technology for Printed Circuit Boards Production**

Pokyny pro vypracování:

1. Popište klasický postup výroby desek plošných spojů (DPS)
2. Uveďte možné alternativy ke klasické výrobě DPS. Zaměřte se především na tlustvrstvé technologie.
3. Připravte vzorky tlustvrstvých struktur pomocí síťotisku a změřte je.
4. Porovnejte klasickou technologii DPS a technologii tlustých vrstev z hlediska výrobních nákladů.

Seznam doporučené literatury:

1. Mach, Pavel., Skočil, Vlastimil., Urbánek, Jan. Montáž v elektronice, Praha: ČVUT, 2001, ISBN: 80-01-02392-3
2. Eichler Petr; Vliv okolního prostředí na tlustvrstvé struktury. [Diplomová práce]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra elektrotechnologie, 2016
3. Szendiuch, Ivan. Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. Brno: VITIUM, 2006. 396 s. ISBN 80-214-3292-6
4. Gupta, Tapan. Handbook of thick and thin film hybrid microelectronics. Hoboken: Wiley Interscience, c2003. ISBN 0-471-27229-9.

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: **31.01.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

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

\_\_\_\_\_ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem 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: .....

.....

Jan Kaltmeyer

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, připomínky a pomoc při zpracování této práce. Zároveň děkuji Janě Rejzlové Šimkové a Ing. Janu Johanovi za čas, který mi věnovali, a za poskytnuté údaje pro ekonomickou část této bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá technologií výroby desek plošných spojů pomocí fotolitografických procesů a alternativní metodou výroby pomocí technologie tlustých vrstev. První dva body práce jsou zaměřeny na popis výrobního procesu, materiálů a jejich vlastností. Třetí část práce popisuje přípravu a měření vlastností vzorků tlustovrstvých struktur vytvořených z organických past pomocí sítotisku. Poslední část práce je věnována porovnání jednotlivých technologií výroby DPS z hlediska ekonomického.

## **Klíčová slova**

Tlustá vrstva, desky plošných spojů (DPS), elektrické parametry, proces výroby, náklady na výrobu

## **Abstract**

This Bachelor thesis deals with the printed circuit boards production technology, using photolithographic processes and alternative production method, using a thick-film technology. First two sections focus on description of a production process, materials and their characteristics. Third part describes sample fabrication and measurement of thick film properties, made of organic pastes by screen printing. Last part covers the comparison of both PCB production technologies from an economic perspective.

## **Key words**

Thick-film, printed circuit boards (PCB), electrical parameters, production process, manufacturing costs

Seznam tabulek .....	2
Seznam obrázků.....	2
Úvod.....	3
1. Klasický postup výroby desek plošných spojů.....	4
1.1. Substráty pro plošné spoje .....	4
1.2. Postup výroby plošných spojů semiaditivní metodou.....	10
1.3. Postup výroby desek plošných spojů subtraktivní metodou .....	15
1.4. Postup výroby plošných spojů aditivní metodou .....	15
2. Tlustovrstvé technologie výroby desek plošných spojů .....	16
2.1. Tlustá vrstva .....	16
2.2. Pasty pro tlustovrstvé technologie.....	16
2.3. Elektrické vlastnosti tlustých vrstev .....	19
2.4. Metody nanášení tlustých vrstev .....	21
2.5. Výpal a vytvrzování natisknutých tlustých vrstev.....	23
2.6. Diagnostika natištěného motivu na desku plošných spojů.....	24
3. Příprava a měření vzorků tlustých vrstev .....	26
3.1. Příprava vzorků.....	26
3.2. Měření odporu vrstvy .....	28
3.3. Měření tloušťky vrstvy a šířky drah motivu .....	28
3.4. Kontrola naneseného motivu.....	29
3.5. Vyhodnocení měření .....	32
4. Porovnání výrobních nákladů na výrobu DPS klasickou metodou a pomocí tlustých vrstev .....	41
4.1. Stanovení výrobních nákladů a zhodnocení investice .....	41
4.2. Náklady na výrobu desek plošných spojů klasickou metodou pomocí fotolitografických procesů .....	43
4.3. Náklady na výrobu desek plošných spojů pomocí technologie tlustých vrstev .....	51
4.4. Porovnání technologií z pohledu ekonomického.....	57
Závěr .....	59
Seznam použité literatury .....	61



## Seznam tabulek

- Tab. 1: Přehled fenolických substrátů
- Tab. 2: Přehled epoxidových substrátů
- Tab. 3: Porovnání vlastností vybraných substrátů
- Tab. 4: Délky jednotlivých cest měřených motivů
- Tab. 5: Vybrané vlastnosti použitých past
- Tab. 6: Porovnání past z hlediska počtu aktivních drah
- Tab. 7: Průměrná tloušťka vrstvy u jednotlivých past
- Tab. 8: Motiv 1- průměrná šířka drah
- Tab. 9: Motiv 2- průměrná šířka drah
- Tab. 10: Motiv 3 - průměrná šířka drah
- Tab. 11: Kalkulace nákladů na 1 vyrobený kus pomocí fotolitografických procesů pro roční produkci 200 000 ks
- Tab. 12: Kalkulace nákladů na 1 vyrobený kus pomocí technologie tlustých vrstev pro roční produkci 200 000 ks

## Seznam obrázků

- Obr. 1: Panelizace desek plošných spojů
- Obr. 2: Výroba desek plošných spojů metodou Pattern - Plating
- Obr. 3: Výroba desek plošných spojů metodou Panel - Plating
- Obr. 4: Problematická místa HAL
- Obr. 5: Struktura vypálené tlusté vrstvy
- Obr. 6: Průběh viskozity pasty při nanášení
- Obr. 7: Rozměry tlusté vrstvy
- Obr. 8: Princip sítotisku
- Obr. 9: Princip šablonového tisku
- Obr. 10: Princip technologie světlocitlivých vrstev
- Obr. 11: Teplotní profil výpalu tlustých vrstev ve čtyřzónové peci
- Obr. 12: Teplotní profil vytvrzování organické pasty
- Obr. 13: Kontrolní výbrus nanesené měděné vrstvy na substrát
- Obr. 14: Natištěné motivy
- Obr. 15: Rozmístění motivů na platě a očíslování destiček v rámci plata
- Obr. 16: Měření tloušťky vrstvy a šířky drah motivu
- Obr. 17: Změřený profil pomocí měřiče profilu
- Obr. 18: Příklad analýzy profilu pomocí programu TalyProfile Gold
- Obr. 19: Slité kontaktní plošky
- Obr. 20: Rozlitá pasta vlivem velkého množství pasty
- Obr. 21: Neslitá pasta - ostrůvky
- Obr. 22: Přerušování vodivé cesty vlivem ucpání oka síta
- Obr. 23: Nerovný povrch a okraj vodivé dráhy
- Obr. 24: Zúžení dráhy vlivem ucpání oka síta
- Obr. 25: Nerovný okraj dráhy
- Obr. 26: Struktura síta

## Úvod

V dnešní době základ většiny elektrických a elektronických zařízení tvoří desky plošných spojů. Vzhledem k trendu miniaturizace většiny elektronických zařízení a růstu množství a technologickému pokroku součástek, které se umísťují na desky plošných spojů, jsou kladeny na desky plošných spojů stále větší technologické nároky. Proto je potřeba zlepšovat současné technologie výroby a případně nacházet nové způsoby výroby desek plošných spojů pro zlepšení vlastností desek plošných spojů, nejlépe při snížení či zachování současné ekonomie výroby.

První část této práce se zabývá popisem klasické technologie výroby desek plošných spojů pomocí fotolitografie, nejprve z pohledu základního přehledu materiálů nejčastěji používaných při výrobě desek plošných spojů a jejich vlastností, následně z pohledu jednotlivých kroků postupu výroby vícevrstevných desek plošných spojů s propojovacími otvory. Úplný přehled používaných materiálů a postupů výroby vzhledem k jejich množství a k rozsahu této práce není možný.

Druhá část této práce je věnována tlustovrstvé technologii výroby desek plošných spojů, která může být alternativou ke klasické metodě výroby desek plošných spojů pomocí fotolitografických procesů. Nejprve uvádím rozdělení past pro tlusté vrstvy a jejich vlastnosti. Dále uvádím metody nanášení tlustých vrstev na substráty a podrobnosti k vytvrzování či výpalu tlustých vrstev. V této části se také zabývám diagnostikou natištěného motivu, avšak metody používané k diagnostice motivu vytvořeného pomocí tlustovrstvé technologie jsou shodné s metodami diagnostiky desek plošných spojů vyrobených klasickou metodou.

Třetí část práce se zabývá přípravou vzorků pomocí sítotisku a měření na připravených vzorcích. V této části práce jsem se snažil ověřit vliv rozměrů nanášené tlusté vrstvy na její vlastnosti, především na elektrický odpor a odpor na čtverec. Měřené vzorky byly rovněž podrobeny zkoumání pomocí optického přístroje za účelem podrobnějšího prozkoumání odhalených vad.

Poslední část práce se zabývá porovnáním technologií pro výrobu desek plošných spojů z hlediska nákladů na výrobu jednovrstvé desky plošných spojů pomocí fotolitografických procesů a technologie tlustých vrstev.

# 1. Klasický postup výroby desek plošných spojů

## 1.1. Substráty pro plošné spoje

Substrátem pro plošné spoje označujeme elektroizolační podložku, která nese součástky, zprostředkovává jejich propojení a také zajišťuje odvod ztrátového tepla ze součástky. Substrát je důležitým prvkem, na kterém závisí výsledné parametry desky plošných spojů, jelikož svými vlastnostmi a chováním ovlivňuje celkovou spolehlivost systému. [2], [7]

Tato podložka je nejčastěji vyrobena z dielektrického tuhého materiálu, pokud je ale nutné, aby bylo možné výslednou desku plošných spojů ohýbat, jsou používány i materiály ohebné. Substráty se rovněž skládají z vodivé vrstvy, která tvoří základ pro budoucí vodivý motiv na desce plošných spojů.

### 1.1.1. Charakteristické vlastnosti substrátů

Vlastností substrátů rozlišujeme poměrně velké množství, lze je rozdělit do několika hlavních skupin. Požadavky na vlastnosti substrátů se pro každou aplikaci liší, proto je třeba vyhodnotit, zda je pro danou aplikaci vlastnost substrátu důležitá či nikoliv.

Mezi charakteristické vlastnosti substrátů dle [2], [12] řadíme:

1. Mechanické vlastnosti (mez pevnosti v ohybu, rozměrová stabilita, nasákavost vodou, pružnost)
2. Tepelné vlastnosti (tepelná odolnost, hořlavost, tepelná vodivost)
3. Elektrické vlastnosti (vnitřní a povrchová rezistivita, permitivita a ztrátový činitel, elektrická pevnost)
4. Stabilita výše zmíněných vlastností při pracovních podmínkách

#### 1.1.1.1. Mechanické vlastnosti

Důležitou skupinou vlastností substrátů pro desky plošných spojů jsou mechanické vlastnosti, které udávají odolnost substrátu vůči výrobním a provozním podmínkám.

Mechanická pevnost substrátů pro desky plošných spojů je charakterizována **mezí pevnosti v ohybu**. Při ohnutí desky plošných spojů by mohlo dojít k jejímu poškození, nebo k poškození natištěného motivu. [12]

Rovněž důležitou mechanickou vlastností substrátu pro desky plošných spojů je **koeficient teplotní roztažnosti (TKR)**, který souvisí s rozměrovou stabilitou substrátu. Prohnutí a zkroucení desek plošných spojů je následkem pnutí, které je způsobeno rozdílnou změnou rozměrů jednotlivých materiálů při změně teploty vzhledem k rozdílným hodnotám TKR. Deska plošných spojů je tak při změně teploty termomechanicky namáhána, proto by měl být teplotní koeficient roztažnosti substrátu srovnatelný s dalšími prvky na desce plošných spojů. Kritická teplota, při níž dochází k výrazným změnám TKR, se nazývá **teplota skelného přechodu  $T_g$** , při této teplotě přechází deska z elastického do plastického stavu. [12]

Při návrhu desek plošných spojů je tak potřeba s tímto jevem počítat a přijmout určitá opatření pro zmírnění tohoto jevu, jako je volba materiálů s podobným koeficientem tepelné roztažnosti, volba spoje a substrátu, který je schopen pohltnout rozdíly rozměrů jednotlivých materiálů. [2]

Mechanickým parametrem, který ovlivňuje použití substrátů pro desky plošných spojů je **nasákavost vodou**, jelikož přítomnost volné vody zhoršuje elektrické vlastnosti substrátu (snižuje elektrickou pevnost a izolační odpor a zvyšuje dielektrické ztráty). [2]

Další mechanickou vlastností substrátů pro desky plošných spojů je **pružnost**, tato vlastnost se neuplatní pouze v případě použití ohebných substrátů, ale také při použití tuhých substrátů, jelikož i tuhé substráty musí mít určitou pružnost, aby se nestaly příliš křehkými.

#### 1.1.1.2. Tepelné vlastnosti

**Tepelná odolnost** je důležitou vlastností substrátu pro desky plošných spojů, jelikož při pájení součástek je substrát krátkodobě vystaven kontaktu s roztavenou pájkou, nebo teplotám, které zaručují přetavení pájecí pasty. [12]

Další z tepelných vlastností substrátů pro desky plošných spojů je **tepelná vodivost**, která označuje schopnost dané látky vést teplo. Je vhodné, aby tepelná vodivost substrátu pro desky plošných spojů byla co nejvyšší, aby bylo zajištěno optimální chlazení součástek a nedocházelo tak k jejich přehřívání. [2]

**Hořlavost** je z bezpečnostního hlediska důležitou vlastností, jelikož určuje schopnost odolávat zapálení substrátu vlivem přehřátí elektronické součástky nebo ohně. [12]

#### 1.1.1.3. Elektrické vlastnosti

Elektrické vlastnosti představují významnou skupinu v souboru požadovaných parametrů substrátů pro desky plošných spojů, zajišťující, aby výsledná deska plošných spojů mohla fungovat dle navržených principů. [12]

##### 1.1.1.3.1. Vnitřní a povrchová rezistivita

Nejdůležitějším elektrickým parametrem substrátů pro desky plošných spojů je vnitřní a povrchová rezistivita, pomocí které lze hodnotit izolační vlastnosti daného substrátu. Vnitřní rezistivita  $\rho_v$  je poměr intenzity elektrického pole a proudové hustoty uvnitř substrátu, zatímco povrchová rezistivita  $\rho_p$  je rovna poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty na povrchu substrátu.

##### 1.1.1.3.2. Relativní permitivita

Relativní permitivita je vlastnost materiálu, která vyjadřuje míru polarizace tohoto materiálu. Polarizace je vyvolána silovým působením elektrického pole na vázané náboje v dielektriku. Průběh polarizace je ovlivněn tím, zda se jedná o látku polární či nepolární. U nepolárních látek polarizace probíhá na úrovni atomů a dipóly vznikají působením elektrického pole tak, že kladný náboj (jádro atomu) se posune ve směru pole a elektronový obal se vychýlí v opačném směru proti směru působení pole. Naproti tomu u látek nepolárních dipóly existují

nezávisle na existenci vnějšího elektrického pole a v případě působení vnějšího elektrického pole točivé momenty způsobí v závislosti na velikosti pole natočení těchto dipólů o určitý úhel ve směru tohoto pole. Mimo působení vnějšího elektrického pole jsou dipóly v polární látce orientovány tak, že se jejich účinek navzájem ruší a látka se chová navenek neutrálně. [13]

Jelikož jsou při vnějším působení elektrického pole všechny dipóly polárního i nepolárního dielektrika orientovány stejným směrem, vybudí elektrické pole, které je orientované opačným směrem a způsobí tak oslabení vnějšího elektrického pole. Velikost relativní permitivity tak vyjadřuje, kolikrát se v látkovém prostředí zmenší intenzita elektrického pole oproti velikosti intenzity elektrického pole ve vakuu. Relativní permitivitu  $\epsilon_r$  tak můžeme vypočítat ze vztahu:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} [-], \quad (1)$$

kde  $\epsilon_0$  je permitivita vakua a  $\epsilon$  je absolutní permitivita.

Permitivita substrátu ovlivňuje kapacitní vazby obvodů tak, že po vložení dielektrika s relativní permitivitou  $\epsilon_r$  se kapacita vazby zvýší  $\epsilon_r$  krát. Toto můžeme pozorovat na vzorci:

$$C_x = \epsilon_r C_0 [F], \quad (2)$$

kde  $C_x$  je výsledná kapacita vazby a  $C_0$  je kapacita vazby ve vakuu.

Permitivita je rovněž závislá na frekvenci, teplotě, obsahu vlhkosti. Zároveň platí, že kvalitnější materiály mají nižší permitivitu. [12]

#### 1.1.1.3.3. Ztrátový činitel

Ztrátový činitel je elektrická veličina rovněž související s jevem polarizace, vyjadřuje míru dielektrických ztrát, tj. ovlivňuje útlum signálů. [12] Dielektrické ztráty v dielektriku jsou tvořeny vodivostními, ionizačními a polarizačními ztrátami. Vodivostní ztráty vznikají v každém dielektriku v důsledku srážek volných nosičů náboje s částicemi tvořící strukturu dielektrika. Ionizační ztráty se vyskytují u dielektrik, které ve své struktuře obsahují částice plynu. Polarizační ztráty vznikají ve střídavém vnějším elektrickém poli natáčením dipólů ve směru pole. Polarizační ztráty jsou závislé na frekvenci vnějšího pole, teplotě, druhu dielektrika, tedy zda se jedná o dielektrikum polární či nepolární. U nepolárních dielektrik jsou dielektrické ztráty téměř zanedbatelné, naopak u látek polárních jsou dielektrické ztráty větší. [13]

#### 1.1.1.3.4. Elektrická pevnost

Elektrická pevnost označuje kritickou velikost intenzity elektrického pole, při níž látka ztrácí svou izolační schopnost a dojde k elektrickému průrazu. Průraz může být tepelný vlivem přílišného ohřátí, což má vliv na jeho strukturu a následné snížení elektrické pevnosti. Průraz čistě elektrický je způsoben uvolněním elektronů vázaných v látce. V praxi se nejčastěji vyskytuje kombinace obou typů průrazů. Elektrická pevnost se označuje  $E_p$  a obvykle se udává v kV/mm. [15]

Vzhledem k tomu, že se na deskách plošných spojů nejčastěji vyskytují malá napětí, není ve většině případů tento parametr příliš důležitý. [2]

### 1.1.2. Rozdělení substrátů

Substráty pro desky plošných spojů můžeme rozdělit podle složení na organické a anorganické, případně podle mechanických vlastností na tuhé a ohebné. Dále rozlišujeme kompozitní substráty, které se skládají z více druhů materiálů s rozdílnými vlastnostmi a kombinují tak výhodné vlastnosti použitých materiálů. Jako poslední skupinu substrátů bychom mohli uvést speciální substráty, se speciálními vlastnostmi, které výše zmíněné skupiny nenabízejí.

#### 1.1.2.1. Organické substráty

Organické substráty se skládají z organické pryskyřice, nejčastěji z epoxidové nebo fenolické ale také z polyimidové, melaminové, polyesterové nebo silikonové a v případě **tuhých substrátů** mohou být vyztuženy jednou nebo několika vrstvami výztuže. **Ohebné substráty** jsou tvořeny pouze pryskyřicemi. U tuhých substrátů výztuž určuje jejich mechanické vlastnosti, nejčastěji se jako výztuž používá skelná tkanina nebo rohož, bavlněný papír, buničitý papír, dále se také používají netkané skelné vlákno, uhlíkové vlákno, křemenné vlákno nebo aramidová tkanina či vlákno. Nejčastěji využívané typy organických substrátů jsou fenolické a epoxidové. [2]

Mezi hlavní výhody organických substrátů patří malá rozměrová omezení při výrobě, hmotnost a dielektrické vlastnosti. Mezi zápory organických substrátů bychom mohli zařadit malou tepelnou vodivost, velký součinitel teplotní roztažnosti a u některých typů navlhavost.[2]

##### 1.1.2.1.1. Fenolické substráty

Fenolické substráty jsou tvořeny fenolformaldehydovou pryskyřicí a jako výztuž jsou nejčastěji použity listy papíru, bavlněné či skelné tkaniny. [2]

Označení substrátu NEMA <sup>1</sup>	Pojivo	Výztuž
FR-1, FR-2, X, Xp, XPC, XX, XXP, XXX, XXXP, XXXPC	Fenolformaldehydová pryskyřice	Papír
C, CE, L, LE		Bavlna
G-3		Skelná tkanina

Tab. 1: Přehled fenolických substrátů, upraveno [12]

##### 1.1.2.1.2. Epoxidové substráty

Základ epoxidových substrátů tvoří epoxidová pryskyřice a výztuž tvoří listy papíru nebo skelná tkanina. V dnešní době nejčastěji používaným substrátem je FR-4, který je na bázi epoxidové pryskyřice s výztuží ze skelné tkaniny. [2]

<sup>1</sup> **Označení materiálu dle organizace NEMA** (National Electrical Manufacturers Association) vyjadřuje pomocí symbolů vlastnosti daného materiálu:

- Symbol X vyjadřuje tvrdost materiálu
- Symbol P označuje křehkost materiálu a také, zda lze v materiálu razit otvory (PC udává možnost razit otvory za studena)

Symboly FR označují nehořlavý materiál

Označení substrátu NEMA	Pojivo	Výztuž
FR-3	Epoxidová pryskyřice	Papír
G-10, G-11, FR-4, FR-5		Skelná tkanina

Tab. 2: Přehled epoxidových substrátů, upraveno [12]

### 1.1.2.2. Kompozitové substráty

Kompozitové substráty spojují výhodné vlastnosti papíru (nízká cena, dobrá děrovatelnost) a skla (vysoká rozměrová stabilita, dobré elektrické vlastnosti). Kompozitové materiály se zpravidla skládají z epoxidem impregnovaného celulózového papíru (CEM-1) nebo skelné rohože (CEM-3), po obou stranách spojeného s jednou vrstvou skloepoxidového prepregu. Kompozitové substráty v některých aplikacích již nahrazují nejčastější substrát typu FR-4. Nevýhodou kompozitního substrátu CEM-1 je prozatím nemožnost pokovování. [2]

### 1.1.2.3. Anorganické substráty

Substráty na anorganické bázi jsou používány spíše než při klasickém postupu výroby desek plošných spojů, ve spojení s technologií tenkých nebo tlustých vrstev. Oproti organickým substrátům mají anorganické substráty výhodu ve vyšší tepelné odolnosti, takže snesou teplotu výpalu tlustých vrstev, rovněž mají nižší koeficient teplotní roztažnosti a jsou chemicky odolné a rozměrově stálé. Mezi nevýhody anorganických substrátů oproti organickým bychom mohli zařadit vyšší hmotnost, vyšší cenu, křehkost, rozměrová omezení při výrobě a toxicitu některých typů. [12]

#### 1.1.2.3.1. Keramické substráty

Keramické substráty se používají na zvláštní typy desek plošných spojů se specifickými vlastnostmi, nejčastěji se keramické substráty používají jako podložky pro tlusté vrstvy, jelikož dokáží odolat vysokým teplotám při výpalu tlustých vrstev. Keramické substráty jsou odolné vůči působení mnoha chemických látek, ale jsou poměrně křehké. Elektrotechnická keramika se dělí na dva typy podle velikosti relativní permitivity. Keramika s hodnotou relativní permitivity vyšší než 12 se používá především pro kondenzátorová dielektrika a keramika s nižší relativní permitivitou se používá jako substráty. [2],[12]

Jedním z keramických substrátů je **korundová keramika**, která se vyrábí z oxidu hlinitého zvaného také alumina. Korundová keramika se stejně jako ostatní druhy keramických substrátů připravuje z jemného prášku v kombinaci s malým množstvím oxidů kovů a skla litím nebo válcováním. Koncentrace oxidu hlinitého v korundové keramice je od 91 do 99,6 %. Nejčastěji se v průmyslu využívá keramika s obsahem 96 % oxidu hlinitého, která poskytuje dobrý kompromis mezi teplotou výpalu a vlastnostmi. Korundové substráty mají poměrně vysokou tepelnou vodivost (přibližně 25 W/mK) a vyznačují se velmi dobrou mechanickou odolností, tepelnou stabilitou, dielektrickými vlastnostmi a rovněž adheze většiny past pro tlusté vrstvy je také velmi dobrá. [2], [12], [26]

Dále mezi keramické substráty náleží **beryliový substrát**, který se vyrábí z oxidu berylnatého. Hlavní předností tohoto substrátu je velmi vysoká tepelná vodivost (250 W/mK), proto se používá pro výkonové obvody, avšak zápory tohoto substrátu jsou jeho toxicita při výrobě, menší pevnost než korundová keramika a vysoká cena. [12]

Posledním ve výčtu keramických substrátů je **Aluminium-nitridová keramika (AlN)**, která byla vyvinuta jako substitut k beryliovému substrátu pro použití ve výkonových obvodech. Aluminium-nitridová keramika má rovněž vyšší tepelnou vodivost než korundová keramika (170 W/mK), hodnota tepelné vodivosti je tak srovnatelná s kovy. Dále se AlN keramika vyznačuje nízkým koeficientem teplotní roztažnosti, dobrými elektrickými a mechanickými vlastnostmi a zároveň nižší cenou oproti beryliové keramice. Rovněž AlN keramika není toxická a potenciálně karcinogenní jako beryliová keramika. [4], [26]

#### 1.1.2.3.2. Substráty na bázi steatitu

Substráty na bázi steatitu (sloučeniny hořčíku) a forsteritu jsou charakterizovány nižší relativní permitivitou, pevností v tahu a tepelnou vodivostí než korundová keramika, proto se používají poměrně zřídka. [26]

#### 1.1.2.3.3. Skleněné substráty

Skleněné substráty se na rozdíl od keramických substrátů používají pro obvody s nižšími výkony a nejčastěji se používají jako substráty pro tenké vrstvy. [2]

#### 1.1.2.4. Speciální substráty

Ve speciálních aplikacích nacházejí uplatnění speciální typy substrátů, disponující vlastnostmi, které neposkytují obvykle používané substráty.

Přizpůsobení tvaru substrátů výslednému nerovinnému tvaru finálního výrobku lze dosáhnout ohybem nevytvrzeného rovinného substrátu a jeho vytvrzením v požadovaném tvaru nebo vytvořením požadovaného tvaru substrátu ve vstřikovacím lisu. Tyto substráty nazýváme **3D substráty**. [2]

Pokud potřebujeme, aby organický substrát měl podobnou tepelnou roztažnost jako montované součástky (např. keramické) je možné upravit koeficient tepelné roztažnosti nahrazením skelné výztuže u organických substrátů za kevlar, takové substráty nazýváme **substráty s přizpůsobenou tepelnou roztažností**. [2]

Ke zlepšení tepelných vlastností substrátů se používá kovové jádro, zmírňující problémy s tepelnou roztažností, a díky dobré tepelné vodivosti kovového jádra rovněž zlepšující tepelnou vodivost. Na kovová jádra se používá poniklovaná ocel s nízkým obsahem uhlíku, na kterou se máčením, postřikem nebo elektroforeticky a následným výpalem nanáší smalt sloužící jako dielektrikum. Výhodou těchto substrátů oproti keramickým, které v některých aplikacích nahrazuje, je nižší cena a absence rozměrových omezení při výrobě substrátu. [2]



	FR-2	FR-3	FR-4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 96 %	BeO	AlN
TKR [ppm/°C]	11	13	11	5,5	5,4	4,5
Tepelná vodivost [W/m.K]	0,24	0,23	0,25	10-35	150-250	170
Relativní permitivita (při 1 MHz)	4,5	4,6	4,9	10	6,7	5,9-6,3
Elektrická pevnost E <sub>p</sub> [kV/mm]	60-70	60-65	35-65	14	14	8,5

Tab. 3: Porovnání vlastností vybraných substrátů, upraveno [1]

## 1.2. Postup výroby plošných spojů semiaditivní metodou

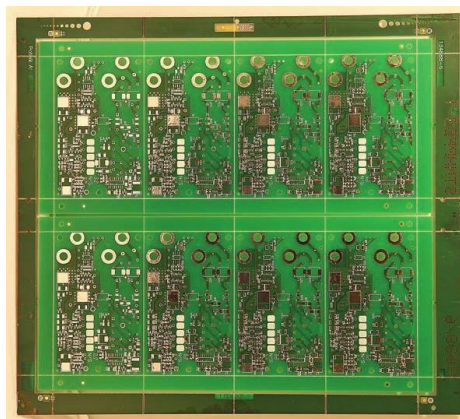
Výroba desek plošných spojů je poměrně složitý a technologicky náročný proces, jehož průběh závisí na motivu, počtu vrstev a dalších parametrech vyráběné desky plošných spojů. Z tohoto důvodu se postup výroby jednotlivých desek plošných spojů liší. Semiaditivní metoda výroby desek plošných spojů využívá základní materiál plátovaný mědí, na který je v průběhu pokovování otvorů nanášena další vrstva mědi.

### 1.2.1. Výroba základního materiálu

V prvním kroku výroby plošného spoje je na základní materiál (substrát) jednostranně nebo i oboustranně nalisována měděná fólie (nejčastěji tloušťky 18, 35, 70 μm) v závislosti na tom, zda je vytvářen jednovrstvý, oboustranný či vícevrstvý plošný spoj. Pro vícevrstvé desky plošných spojů je výchozí materiál oboustranně plátovaný mědí. [2]

### 1.2.2. Dělení základního materiálu

Připravený polotovár desky plošných spojů má poměrně velké rozměry (1 m<sup>2</sup>), proto je nařezán na menší přířezy. Při zpracování desek plošných spojů se využívá tzv. panelizace, kdy je na jednotlivých přířezech více výsledných desek plošných spojů, které tak jsou zpracovávány současně. Při vytváření přířezů je nutné počítat nejen s omezeními používaných technologií při realizaci požadovaného motivu na okrajích přířezů, ale také s umístěním základacích otvorů pro docílení definované polohy ve všech výrobních a kontrolních operacích. Proto musí mít přířez na okrajích 1-2 cm volný prostor. [2]



Obr. 1: Panelizace desek plošných spojů [30]

Dělení základního materiálu je nejčastěji realizováno stříháním na nůžkách doplněné o úpravu hran pomocí frézování či broušení. [12]

### **1.2.3. Vrtání zakládacích (technologických), součástkových a propojovacích otvorů**

Následujícím krokem při výrobě desky plošných spojů je vrtání zakládacích otvorů na jejich okrajích, přičemž přesnost zakládacích otvorů má vliv na přesnost výroby celé desky. Vyvrtané zakládací otvory mají různý průměr a jsou orientovány excentricky tak, aby deska při všech technologických operacích mohla být orientována pouze jedním způsobem a nevznikly tak chyby, způsobené nesprávným založením desky. Vrtání je realizováno buď třískově – pomocí vrtačky, nebo laserem. Obvykle je při vrtání technologických otvorů vrtáno více přířezů najednou a to kvůli zrychlení operace vrtání, ale také současně pro eliminaci otřepů, které vznikají na okrajích děr bez použití krycích desek, avšak při větším množství vrtaných desek najednou se přesnost vrtání snižuje. [2], [6]

Přípevnou-li se na výslednou desku plošných spojů součástky pomocí THT technologie, je nutný proces vrtání součástkových otvorů, kterými jsou protaženy drátové vývody osazované součástky a na druhé straně otvoru zapájeny. Nevýhodou této technologie montáže je nutnost vrtání velkého množství otvorů, při použití povrchové montáže SMT nebo smíšené montáže je množství vrtaných otvorů podstatně nižší. [12]

Při vrtání propojovacích otvorů zabezpečujících elektrické propojení obou stran desky plošných spojů není možné, vzhledem k malé délce šroubovice vrtáku a vysokým nárokům na kvalitu otvoru, vrtat mnoho přířezů najednou, se zmenšováním průměru vrtáku je nutné zmenšovat počet vrtaných přířezů a dokonce, při vrtání otvorů s velmi malými průměry (0,4 mm) je doporučeno vrtání pouze jednoho přířezu. [12]

V případě výroby vícevrstvých desek plošných spojů je vrtání propojovacích otvorů realizováno až po provedení procesu laminace jednotlivých vrstev DPS.

### **1.2.4. Mechanické a chemické čištění**

Následně jsou budoucí DPS a v nich vyvrtané otvory zbaveny otřepů, nečistot, mastnoty a prachu mechanickým a chemickým očištěním. Proces čištění otvorů a povrchu desek je velice důležitý, jelikož je nutné zajistit kvalitní vodivé propojení mezi jednotlivými vrstvami, aby nebyla ohrožena funkčnost celé desky plošných spojů. Mechanické čištění je realizováno pomocí kartáčování v radiálním a axiálním směru za současného omývání vodou. [12]

Otvory je nejčastěji nutné čistit od tzv. přemazu pryskyřice, který vzniká v důsledku měknutí pryskyřice vlivem tření při vrtání DPS se substrátem tvořeným pryskyřicemi. Toho se dosahuje pomocí máčení ve změkčovači, který způsobí změknutí případných přemazů z pryskyřice ve vyvrtaných otvorech, a poté ponořením polotovaru do manganistanu draselného, který změkklou pryskyřici rozpustí. [9]

### **1.2.5. Pokovení otvorů a zesílení vrstvy mědi**

Při pokovování vyvrtaných otvorů je nejprve nanесena vrstva uhlíku (dříve se používalo palladium) bez použití elektrického proudu, dojde tak k elektrickému propojení obou stran desek. Následně se na zárodečných centrech uhlíku či palladia při máčení v chemické lázni vyredukuje tenká měděná vrstva (0,5 - 1 μm). Tato měděná vrstva není mechanicky odolná,

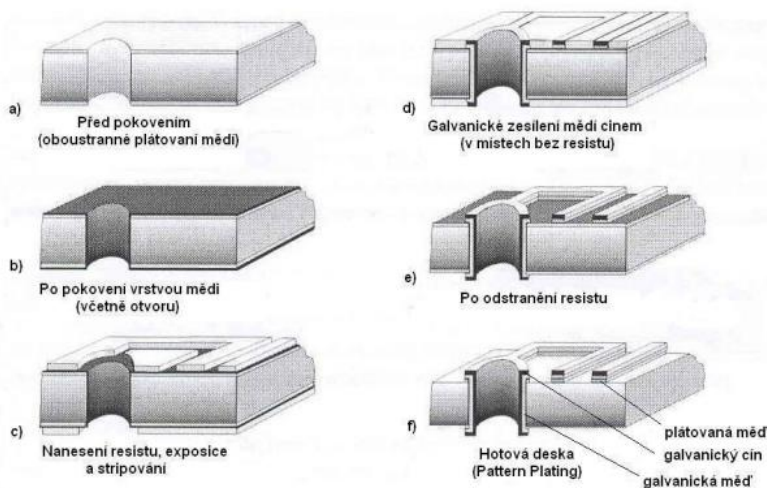
proto je nutné jí ihned galvanicky zesílit použitím kyselých roztoků. Pokovení vyvrtaných otvorů rovněž může být realizováno vyplněním epoxidovou pastou s keramickým plnivem. [12]

### 1.2.6. Tvorba motivu

Motiv na desce plošných spojů semiaditivním způsobem je možné vytvořit dvěma metodami - metodou pokovení obrazce (Pattern - Plating) a metodou pokovení desky (Panel - Plating). Metoda pokovení obrazce je v praxi využívána častěji, jelikož touto metodou lze poměrně snadno vytvořit jemné motivy a je minimalizováno pokovení na plochách, které jsou později odleptány, což se promítá v menší spotřebě mědi, leptadla a kratší době leptání. Díky kratší době leptání a lepší ochraně měděné vrstvy leptuodolnou vrstvou než fotorezistem je rovněž omezeno podleptávání vodivých struktur. Všechny tyto výhody se následně promítají v nižší výrobní ceně. [2]

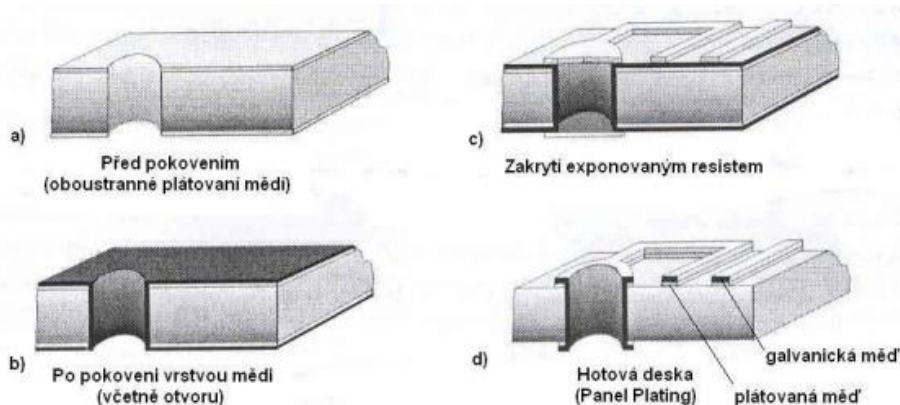
**Metoda pokovení obrazce (Pattern - Plating)** probíhá následovně [2]:

1. Základní materiál s vyvrtanými otvory je po celém povrchu pokryt rezistem pomocí naválcování fólie z fotorezistu nebo nanesením tekutého rezistu pomalým vytahováním desky z roztoku, nanášením na odstředivce nebo navalováním na válcích. Tekutý rezist je následně nutné vysušit. [12]
2. Rezist je vyexponován nejčastěji fotolitograficky pomocí UV záření přes film, přičemž vytvrzení závisí na typu rezistu – negativní rezist je vytvrzen pouze v místě, který byl osvětlen přes masku a naopak pozitivní fotorezist se stává ozařováním rozpustným ve vývojce. Z toho vyplývá, že masky pro pozitivní a negativní fotorezist jsou tak navzájem komplementární.
3. Dalším krokem je tzv. vyvolání ve vývojce – nevytvrzený rezist je smyt a na základním materiálu zůstává pouze vytvrzený rezist.
4. Následuje galvanické zesílení vodivého obrazce mědí na minimální tloušťku 15  $\mu\text{m}$  a nanesení leptuodolné vrstvy tvořené nejčastěji cínem nebo jeho slitinami o tloušťce alespoň 12  $\mu\text{m}$ . [12]
5. Dále je odstraněn stripováním vytvrzený fotorezist například pomocí horkého roztoku vody a 1% etylalkoholu.
6. Na závěr je selektivně odleptána pomocí kyseliny chromsírové měděná vrstva, která není chráněná vrstvou cínu. [12]



Obr. 2: Výroba desek plošných spojů metodou Pattern - Plating [25]

**Metoda pokovení panelu (Panel - Plating)** se od metody pokovení obrazce odlišuje tím, že je pokovením nanášena vrstva mědi na celou plochu plátovaného základního materiálu, a po nanesení, expozici a vyvolání fotorezistu je měděná vrstva chráněna před odleptáním pouze vrstvou vytvrzeného fotorezistu. Výhodou této metody je menší počet kroků výroby motivu, avšak dochází k většímu podleptání motivu. [2]



Obr. 3: Výroba desek plošných spojů metodou Panel – Plating [25]

### 1.2.7. Kontrola a testování motivu

Po nanesení motivu následuje kontrola či testování naneseného motivu. Tato problematika bude podrobněji projednána v kapitole 2.6. Diagnostika natištěného motivu na desce plošných spojů.

### 1.2.8. Černění motivu

Při výrobě vícevrstvých DPS, je nutné pro lepší přilnutí další vrstvy DPS provést úpravu vlastností motivu z hlediska tepelné stability. To je realizováno tzv. černěním, kdy je na motivu vytvořena vrstva oxidů. [11]

### 1.2.9. Laminace

Proces, při kterém jsou jednotlivé vrstvy DPS za působení tepla a tlaku slisovány dohromady, nazýváme laminace. Vnitřní vrstvy se spojují pomocí tzv. prepregů (lepících listů), což jsou nevytvrzené základní materiály, které se při procesu laminace dotvrdí. [9], [12]

### 1.2.10. Nanášení nepájivé masky

Aby byla zajištěna budoucí spolehlivost DPS, je potřeba vytvořený motiv ochránit před následným pájecím procesem a účinkům provozního prostředí a to především proti: oxidaci, vlhkosti, mechanickému a chemickému poškození. K tomuto účelu se používá nepájivá maska, která může být jednosložková nebo dvousložková. Původní jednosložková nepájivá maska byla v tekuté formě nanášena pomocí sítotisku na plochy, které měla ochránit. V dnešní době ji nahradila maska dvousložková a to kvůli lepším vlastnostem a z ekologických důvodů. Z důvodu vyšší přesnosti umístění se dnes spíše používají fotocitlivé nepájivé masky, které jsou v podobě tenké fólie nanášeny laminováním na celou DPS a následně jsou přes negativní film (zakryté části nebudou vytvrzeny) osvětleny. Nevytvrzená nepájivá maska na pájecích ploškách je odmyta. [8]

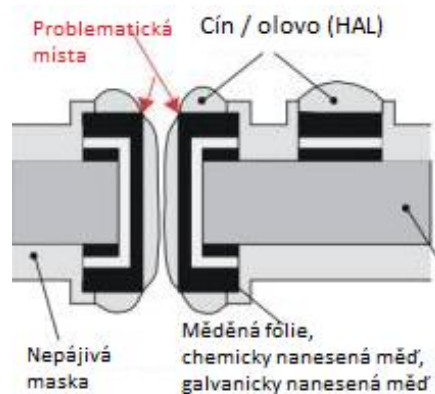
### 1.2.11. Nanesení servisního potisku

Pro zvýšení přehlednosti desky se nanáší servisní potisk, vyznačující umístění součástek a popisující kontakty apod. Nanesení servisního potisku probíhá opět na podobném principu jako fotolitografický proces nebo nanášení nepájivé masky. V souvislé vrstvě je na desku plošných spojů nanesena fotocitlivá barva, která se po vyschnutí osvítlí přes film, neosvětlená barva je odmyta a zůstává zachována pouze osvětlená část, tvořící servisní potisk. [8]

### 1.2.12. Povrchová úprava

Povrchová úprava desky plošných spojů chrání povrch motivu desky plošných spojů, který není chráněn nepájivou maskou, proti vnějším vlivům (prach, vlhkost, látky způsobující korozi motivu), které by mohly negativně ovlivnit spolehlivost a životnost desky plošných spojů. Povrchová úprava se provádí více způsoby: žárové nanášení pájky (HAL), použití organických inhibitorů (OSP) nebo pájecích laků, chemické cínování, chemické zlcení nebo galvanické zlcení konektorů. [12][14]

Žárové nanášení pájky HAL (Hot Air Solder Levelling) je základní povrchovou úpravou desek plošných spojů. Ochranná vrstva je realizována ponořením desky plošných spojů do roztavené pájky a následným odstraněním přebytečné pájky pomocí horkovzdušného nože. Nevýhodou technologie HAL je nerovnoměrná tloušťka vytvořené vrstvy – do otvorů a na plošky je nanesena příliš tlustá vrstva, zatímco na hranách je tloušťka vrstvy nedostatečná, proto je v dnešní době nahrazována jinými metodami. [14]



Obr. 4 Problematická místa HAL [22]

Povrchová úprava založená na použití organických inhibitorů (OSP) funguje na principu absorbování efektivních složek povrchem mědi pomocí Van der Waalových sil, což má za následek zamezení vzniku intermetalických sloučenin mezi mědí a povrchovou úpravou. Tato vrstva má vynikající tepelnou a vlhkostní odolnost. Rovněž rovinnost povrchu je výborná. [21]

Ochranné vrstvy vytvářené chemickým cínováním či zlcením ponořením v kyselé bezproudé cínovací lázni mají oproti žárovému nanášení pájky výhodu v rovinnosti a rovnoměrnosti nanesené vrstvy a díky nízké teplotě, při které se proces provádí je omezeno tepelné namáhání DPS. [14], [21]

Povrchová úprava desek plošných spojů realizovaná pomocí pájecích laků se v dnešní době nepoužívá z důvodu problémů při skladování lakovaných desek a při strojním pájení.

### 1.2.13. Konečné mechanické operace

Na závěr procesu výroby jsou desky plošných spojů upraveny odstřížením či frézováním na konečné rozměry. [12]

#### **1.2.14. Kontrola motivu**

Po dokončení procesu výroby je nutné hotové desky plošných spojů zkontrolovat, zda mají potřebnou kvalitu a omezit tak zmetkovitost výroby. Kontrola může být provedena vizuálně pracovníkem nebo automatizovaně. Vizuální kontrola pracovníkem je nejméně spolehlivá, jelikož pozornost pracovníka s časem klesá. Automatizovanou kontrolu lze rozdělit na dva typy – měření elektrických vlastností pomocí sond (jehel) nebo optický tester pro kontrolu motivu.

#### **1.3. Postup výroby desek plošných spojů subtraktivní metodou**

Při vytváření vícevrstvých plošných spojů s pokovenými otvory subtraktivní metodou je použit základní materiál, který je plátován mědí. Na rozdíl od semiaditivní metody není měděná vrstva během procesu výroby nijak zesílena. Motiv na desce plošných spojů je realizován odleptáním či vyražením a sloupnutím přebytečné vrstvy mědi. Vzhledem k poměrně vysoké ceně výroby razníku ve tvaru výsledného motivu je motiv ve většině případů realizován leptáním.

#### **1.4. Postup výroby plošných spojů aditivní metodou**

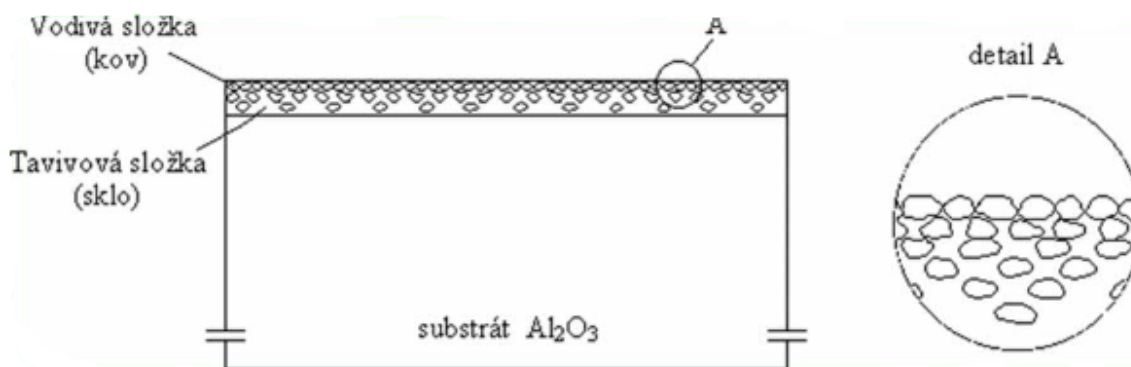
Při vytváření vícevrstvých plošných spojů s pokovenými otvory aditivní technologií jsou vodivé cesty na substrátu realizovány selektivním pokovením až společně s pokovováním děr. Proces pokovování mědí nebo dalšími kovovými povlaky je realizován chemickým nanášením. Výhodou této metody je, že se v procesu nevyskytuje leptání, čímž se předchází možným komplikacím, které jsou s leptáním spojené (podleptání, zkratky způsobené oddělenými převisy, zpracování odpadů po leptání). Další výhodou, na rozdíl od subtraktivní metody, je, že není základní materiál spojován s mědí za tepla, čímž se zamezí problémům se vznikem pnutí a případného prohnutí či zkroucení desky. [12]

## 2. Tlustovrstvé technologie výroby desek plošných spojů

Technologie tlustých vrstev patří mezi vrstevové technologie, pro které platí, že tloušťka nanášené vrstvy je podstatně menší než ostatní rozměry vrstvy. Technologie tlustých vrstev je nevakuový depoziční proces, který je založen převážně na nanášení pasty na podložku přes síto, šablonu, nebo pomocí dispenseru. Nejčastěji používanými způsoby pro nanášení tlustých vrstev jsou sítotisk a šablonový tisk. Kromě tlustovrstvé technologie mezi vrstevové technologie patří také technologie tenkých vrstev. Ta je vytvářena pomocí vakuových depozičních procesů napařováním a napařováním. Tlustovrstvé technologie výroby desek plošných spojů rovněž můžeme zařadit mezi aditivní technologie. Pomocí tlustovrstvých technologií mohou být vytvářeny desky plošných spojů a mohou tak nahradit fotolitografické procesy, které jsou v současné době nejčastěji používané při výrobě DPS.

### 2.1. Tlustá vrstva

Tlustou vrstvou označujeme vrstvu amorfni struktury, jejíž tloušťka je podstatně větší než střední volná dráha elektronu, což je dráha, kterou průměrně urazí částice mezi dvěma srážkami, tedy v řádu jednotek až desítek mikrometrů. Vlastnosti tlustých vrstev, na rozdíl od tenkých vrstev, nejsou ovlivňovány tloušťkou vrstvy, ale závisí spíše na složení pasty. Kvalita natištěné vrstvy je rovněž velice ovlivňována volbou materiálu podložky. Jako podložky pro tlusté vrstvy z anorganických past se nejčastěji používají anorganické substráty zmíněné v kapitole 1.1.2.3 této práce, jelikož anorganické pasty se vypalují při teplotě nad 800°C a organické substráty těmto teplotám nemohou odolat. Pro polymerní (organické) vrstvy je možné použít i organické substráty, jelikož polymerní vrstvy se vytvrzují přibližně při 200°C. [2], [3], [4]



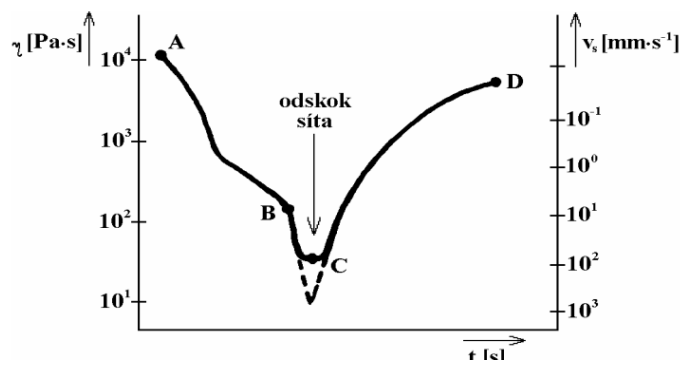
Obr. 5 Struktura vypálené tlusté vrstvy [5]

### 2.2. Pasty pro tlustovrstvé technologie

Motivy nanášené na substrát jsou realizovány pomocí past. Na podložku mohou být nanášeny různé pasty, ty jsou podle obsahu prvků buď vodivé, odporové nebo dielektrické. Pasty, které chceme použít v tlustovrstvých technologiích, musí být tixotropní, aby při odsokku síta nebo šablony od podložky došlo ke snížení viskozity a tím i k lepšímu spojení jednotlivých složek a k dobré adhezi k podložce. U tixotropních materiálů je viskozita závislá na mechanickém tlaku a je nejnižší v bodě C (viz. Obr. 6 na následující straně).



Pasty se skládají z funkční, pojivové, organické a modifikující složky. Jednotlivé složky se vyznačují různými chemickými a fyzikálními vlastnostmi a v pastě plní různý účel. Výsledný charakter pasty je určen funkční složkou, soudržnost pasty s podložkou zajišťuje složka pojivová, viskozita pasty je upravena pomocí modifikující složky a jako nosič



Obr. 6 Průběh viskozity pasty při nanášení [10]

všech ostatních složek slouží organická složka, která se v průběhu procesu sušení a výpalu odpaří a nepodílí se na výsledných vlastnostech pasty. [2]

Pasty pro tlustovrstvé technologie můžeme rozdělit podle jejich složení na organické a anorganické a podle jejich funkce na vodivé, odporové, dielektrické, izolační a speciální. [10]

### 2.2.1. Rozdělení past podle složení

#### 2.2.1.1. Anorganické

Anorganické pasty mohou být nanášeny pouze na podložky, které odolají vysoké teplotě při výpalu pasty, takové podložky jsou například keramické, skleněné či korundové. Rovněž podložky musí splňovat další kritéria, jako jsou planarita, poréznost a drsnost povrchu, všechny tyto vlastnosti totiž ovlivňují kvalitu natisknuté vrstvy. Anorganické pasty jsou tvořeny všemi výše zmíněnými složkami. [2], [3]

Funkční složka je tvořena v závislosti na požadovaných vlastnostech pasty jemným práškem, obsahujícím částice kovů, oxidů kovů, skla nebo keramiky. Anorganické pasty obsahují i složku pojivovou, která je nejčastěji tvořena skleněnou fritou z jemného prášku z olovnatoboritokřemičitého, vizmutokřemičitého nebo hlinitokřemičitého skla. [2]

Organická složka anorganické pasty je tvořena z polymerní části, která je obvykle tvořena polyvinylacetátem, polyvinylalkoholem nebo etylcelulózou, a z rozpustidlové části, která je tvořena xylenem nebo terpentýnem. [2]

Poslední složkou, ze které se skládají anorganické pasty, je složka modifikující, která upravuje viskozitu pasty. Za tímto účelem je nejčastěji používán borovicový olej nebo terpeneol. [2]

#### 2.2.1.2. Organické

Organické pasty se oproti anorganickým pastám vyznačují odlišným složením, a to na základě požadovaného snížení vypalovací teploty pod 200°C, aby mohly být nanášeny i na podložky, které by nevydržely vysokou teplotu při vypalování anorganických past, jako jsou například plastové fólie. Organické pasty jsou pouze vytvrzovány, čímž se stávají vhodnými pro tisk na méně tepelně odolné substráty. Tyto pasty jsou tvořeny na základě polymerních pryskyřic, přičemž jednotlivé složky mají jinou skladbu, a pojivová a modifikující složka je zcela



vynechána, jelikož jejich funkci nahrazuje organická složka. Organické pasty jsou tedy tvořeny složkou pouze složkou funkční a organickou. [2]

Funkční složka organických past je tvořena z odlišných materiálů než u anorganických past a v některých případech může funkční složku nahradit složka organická. [2]

Mezi hlavní nevýhody organických past oproti pastám anorganickým je dle [5] vyšší odpor vodivých vrstev, omezená pracovní teplota, omezené výkonové zatížení, nižší tepelná vodivost, špatná odolnost vůči vlhkosti a omezení při pájení.

## **2.2.2. Rozdělení past podle funkce**

### 2.2.2.1. Vodivé

Jako vodivou pastu označujeme takovou pastu, jejíž hlavní vlastností je vysoká elektrická vodivost. Ta je dána složením funkční složky pasty. Funkční složka vodivé anorganické pasty se skládá z kovových částic (Ag, Au, Pt, Pd a další). [2]

Vodivá pasta může být i na bázi mědi. Technologie TPC (Thick Printed Copper), která spočívá v nanášení měděných past na substrát pomocí šablonového tisku či sítotisku a následného vypalování pasty ve vakuu a v dusíkové atmosféře, aby se zamezilo nežádoucí tvorbě oxidů. Výhodou využití měděných past je nízký odpor na čtverec ( $\leq 1 \text{ m}\Omega/\square$ ) a velmi dobrá tepelná vodivost. [26], [27]

### 2.2.2.2. Odporové

Hlavní vlastností odporových past je vysoký elektrický odpor. Anorganické odporové pasty mají funkční složku tvořenou kovy nebo oxidy kovů (např. Ag, Pd,  $\text{RuO}_2$ ,  $\text{IrO}_2$ ), zatímco u organických odporových past je funkční složka tvořena především uhlíkem. [2]

### 2.2.2.3. Dielektrické a izolační

Dielektrické a izolační pasty lze opět rozdělit na organické a anorganické, které se od sebe liší svým složením. Hlavní vlastností dielektrických a izolačních past je permitivita  $\epsilon$ . U organických past je tato hlavní vlastnost zprostředkována přímo pomocí organické složky – pryskyřice. U anorganických past je funkční složka tvořena jemným práškem ze skel, oxidu hliníku  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo keramiky používané pro keramické kondenzátory typu I (na bázi  $\text{TiO}_2$ ) a typu II (na bázi  $\text{BaTiO}_3$ ). [2]

### 2.2.2.4. Speciální

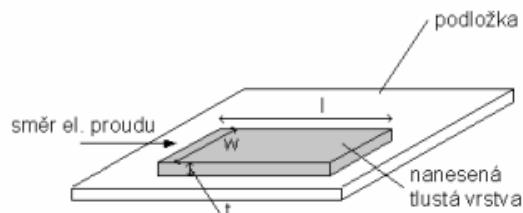
Na substrát mohou být rovněž nanášeny pasty, které mají specifické vlastnosti. Mezi takovéto pasty můžeme zařadit pasty termistorové, magnetické, luminiscenční a další. [1]

## 2.3. Elektrické vlastnosti tlustých vrstev

Elektrické vlastnosti tlustých vrstev patří mezi nejdůležitější vlastnosti natištěné tlusté vrstvy. Tyto vlastnosti předurčují kvalitu vrstvy a možnosti jejího použití.

### 2.3.1. Odpor na čtverec

Z elektrických vlastností tlustých vrstev se nejčastěji setkáme s odporem na čtverec, který vyjadřuje velikost odporu vrstvy čtvercového tvaru, šířka vrstvy  $w$  je tedy rovna její délce  $l$ . Hodnota vrstevového odporu je stanovena pro určitou tloušťku vrstvy  $t$ , kterou bude vrstva mít při dodržení předepsaného technologického postupu při její výrobě. Pokud nám jsou známy rozměry obdélníkového odporu, můžeme dle [4] stanovit teoretickou hodnotu odporu  $R$ :



Obr. 7 Rozměry tlusté vrstvy [4]

$$R = R_{\square} \frac{l}{w} = \frac{\rho}{t} \frac{l}{w} [\Omega], \quad (3)$$

kde  $R_{\square}$  je odpor na čtverec,  $l$  je délka odporu a  $w$  je jeho šířka,  $\rho$  je rezistivita a  $t$  je tloušťka vrstvy.

### 2.3.2. Vodivost a rezistivita

Typickými elektrickými parametry jsou elektrická vodivost  $G$  a její převrácená hodnota elektrický odpor  $R$ . Elektrická vodivost označuje schopnost látky vést elektrický proud, čím je tedy elektrická vodivost vyšší, tím větší elektrický proud látkou prochází při stejném napětí. Vodivost určíme ze vztahu:

$$G = \frac{I}{U} [S], \quad (4)$$

kde  $I$  je elektrický proud procházející látkou a  $U$  je velikost napětí na jejích koncích.

Rezistivita je materiálová konstanta, vyjadřující elektrický odpor vodiče jednotkové délky a jednotkového průřezu. Rezistivitu určíme ze vztahu:

$$\rho = \frac{RS}{l} [\Omega \cdot m], \quad (5)$$

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

### 2.3.3. Teplotní koeficient odporu

Velikost elektrického odporu se s rostoucí teplotou zvětšuje, teplotní koeficient odporu  $\alpha$  dle [11] udává největší relativní změnu odporu materiálu odpovídající nárůstu teploty o 1°C v rozsahu teplot, ve kterých je tato změna vratná. Teplotní koeficient odporu udává vztah:

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta t} [\text{K}^{-1}], \quad (6)$$

kde  $\Delta R$  je změna elektrického odporu při změně teplot  $\Delta t$  a  $R_0$  je počáteční velikost odporu.

### 2.3.4. Proudová zatížitelnost

Proudová zatížitelnost vyjadřuje maximální velikost proudu, který může protékat vodičem, aniž by byla ovlivněna funkce obvodu nebo byla překročena provozní teplota vlivem tepelných účinků elektrického proudu. Důsledkem překročení provozní teploty může být přerušování vodivé cesty, roztavení pájky, nebo poškození součástky na desce plošných spojů.

### 2.3.5. Vrstvová kapacita

Vlastnost vrstvy, udávaná v případě použití dielektrické vrstvy, je vrstvová kapacita, která je definována jako měrná hodnota vztažená ke konstantní tloušťce dielektrika. Vzorec pro výpočet vrstvové kapacity vychází ze vztahu pro deskový kondenzátor:

$$C = 0,0885 \cdot \varepsilon_d \cdot \frac{a \cdot b}{t_d} = C_0 \cdot a \cdot b = C_0 \cdot S_c \quad (7)$$

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

## 2.4. Metody nanášení tlustých vrstev

### 2.4.1. Sítotisk

Sítotisk je tlustovrstvá technologie, při níž je požadovaný motiv nanesen protlačením pasty těrkou přes oka síta, která nebyla zamaskována, na podložku. Síto, které je vyrobeno z ocelových nebo umělých vláken, je v určité vzdálenosti od podložky napnuto v rámu, tato vzdálenost se nazývá odtrh. Při pohybu těrka působí na síto silou, což má za následek přitisknutí sítky k podložce. Při nanášení se využívá výrazného snížení viskozity nanášeného materiálu a následného zvýšení viskozity po odskoku síta od podložky. [1][2]

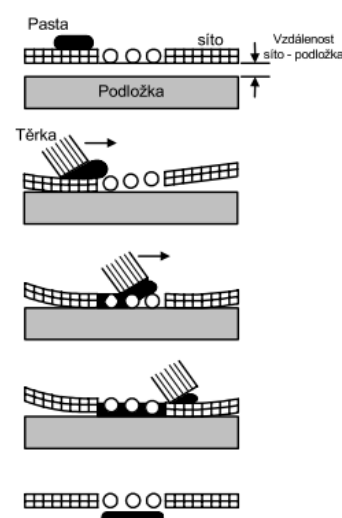
Mezi hlavní chyby při sítotisku dle [1] řadíme nepřesně nanesený motiv, nerovnoměrnou tloušťku vrstvy a nerovné obrysy kontur. Chyby při nanášení motivu na substrát mohou způsobit nehomogenitu proudové hustoty při průchodu elektrického proudu, což může způsobit lokální přehřívání pasty v místě s větší proudovou hustotou, a následnou rychlejší degradaci vrstvy.

Faktory, ovlivňující přesnost a reprodukovatelnost nanášeného motivu, jsou dle [1] materiál vrstvy, šablona, substrát, zařízení, operátor, obsluha a prostředí.

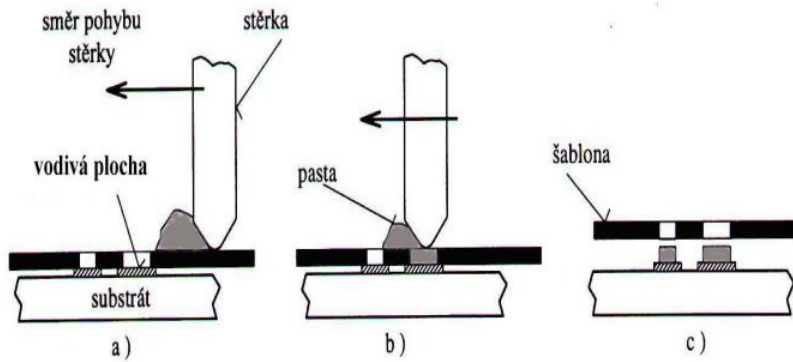
Mezi proměnné, které ovlivňují tloušťku nanesené vrstvy, patří tlak na těrku, rychlost pohybu těrky, tvrdost těrky, sklon těrky, odskok, viskozita pasty, teplota a napnutí síta, velikost ok a tloušťka tkaniny. [28]

### 2.4.2. Šablonový tisk

Šablonový tisk je obdobou sítotisku, při které se k tisku požadovaného motivu na podložku používá šablona. Šablonou rozumíme pevnou kovovou (např. bronzovou, nerezovou) planžetu, ve které jsou proleptáním nebo laserem vytvořeny otvory, kterými je těrkou protlačena pasta na podložku. Šablona je na rozdíl od síta při sítotisku přikládána kontaktně přímo na podložku a odtrh je realizován až po dokončení pohybu těrky. Aby byla nanesená pasta správně oddělena od šablony a zůstal tak na podložce zachován nanesený motiv, musí být odtrh proveden dostatečně rychle (přibližně 10 mm/s). Šablona je rovněž zpravidla upevněna v rámu se zabudovaným napínacím mechanismem. Velikost otvorů v šabloně a tloušťka šablony určují množství nanesené pasty na podložku. Mezi nevýhody šablonového tisku patří také nutnost přizpůsobení návrhu tištěného motivu, aby nebyla narušena tuhost šablony, což by mohlo způsobit problémy při odskoku šablony po nanesení pasty. [5] Další nevýhodou je nutnost tisku pouze plných motivů, například není možné realizovat motiv, který má tvar mezikruží.



Obr. 8 Princip sítotisku [4]



Obr. 9: Princip šablonového tisku [10]

### 2.4.3. Micro-Screen

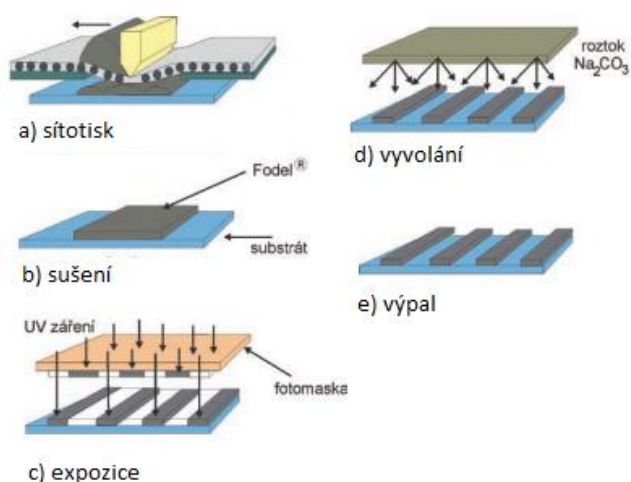
Jedná se o metodu, vycházející z šablonového tisku. Díky šabloně s otvory realizovanými mikroreptáním, která je doplněna o organickou těsnící vrstvu zabraňující rozlití pasty, lze dosáhnout vyšších rozlišení čar a mezer, díky čemuž lze realizovat motiv na menší ploše a v některých případech se tak lze vyhnout nutnosti realizace vícevrstvého plošného spoje. [23]

### 2.4.4. Dávkovací nanášení pasty na podložku

Nanášení potřebného množství pasty na podložku je prováděno pomocí dispenseru. Tlustá vrstva je vytvářena dotykem nebo vytlačení ze zásobníku pomocí dutých či plných jehel. Dispenser lze ovládat ručně, nebo programově řízeným mechanismem, který ovládá množství vytlačované pasty. Zejména programově řízený dispenser je používán tam, kde je potřeba přesné dávkování nanášeného množství pasty či lepidla, nebo není možné (nebo výhodné) použít šablonový tisk nebo sítotisk. [23]

### 2.4.5. Technologie světlocitlivých vrstev

Technologie světlocitlivých vrstev využívá princip podobný klasickému fotolitografickému procesu při výrobě desek plošných spojů. Nejčastěji na korundový substrát je nanášena fotocitlivá pasta, která po vysušení a následné expozici ultrafialovým zářením přes šablonu, díky obsahu fotosenzitivního polymeru představujícího organickou složku pasty, změní svou strukturu tak, že při následném vyvolání v 0,8-1 % roztoku  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  mohou být selektivně odstraněny pouze neosvětlené části vrstvy. Následně probíhá výpal takto



Obr. 10: Princip technologie světlocitlivých vrstev, upraveno [3]

vytvořeného motivu. Výhodou této technologie je, že tlustá vrstva je tištěna v souvislé vrstvě a také, že lze dosáhnout podobného rozlišení motivu jako u desek plošných spojů vyrobených klasickými postupy pomocí fotolitografických procesů. [2], [16]

#### 2.4.6. Odleptávaná vodivá vrstva

Technologie, která funguje na podobném principu jako světlocitlivá vrstva, s tím rozdílem, že natištěná souvislá vrstva je nejprve vypálena a až poté je fotolitograficky opracována. Výhoda tohoto postupu oproti technologii světlocitlivých vrstev spočívá v potlačení rozměrové kontrakce vyvolaného motivu při výpalu vlivem odpaření organické složky. Takto vytvořené plošné spoje se používají v obvodech, pracujících při kmitočtech v řádu desítek GHz. [2]

#### 2.5. Výpal a vytvrzování natisknutých tlustých vrstev

Aby měla vrstva požadované vlastnosti, je nutné jí aktivovat tepelným zpracováním. Pasta je v závislosti na tom, zda se jedná o pastu organickou či anorganickou, vytvrzována nebo vypalována. V průběhu tepelné úpravy se vytváří spojení tlusté vrstvy se substrátem a vlastní struktura vrstvy, kde funkční složka amorfního charakteru tvoří souvislou vrstvu na povrchu a pojivová složka tvoří vazbu mezi substrátem a funkční složkou. Po procesu vypalování nebo vytvrzování má vrstva požadované mechanické a elektrické vlastnosti, a navíc je odolná i proti chemickým vlivům. [5], [1]

**Výpal** anorganických past probíhá v oxidační či redukční atmosféře v průběžné peci, v závislosti na složení pasty probíhá podle daného teplotního profilu (viz obr. 9), který se skládá z několika úseků [1]:

1. **Sušení**

Sušení probíhá při teplotě 70-150 °C po dobu 15-30 minut. Během tohoto úseku dojde k vyprcháání těkavých složek pasty.

2. **Předeřev**

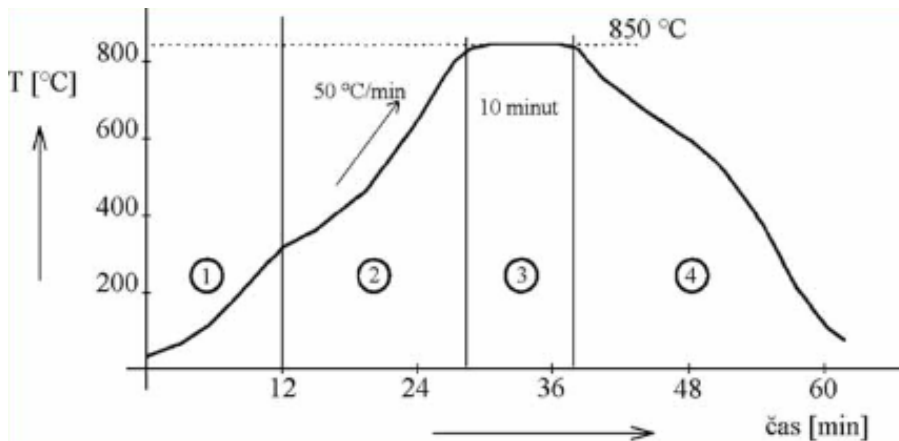
Dále následuje předeřivací zóna, kde dochází k pozvolnému nárůstu teploty na teplotu vypalování. Nárůst teploty nesmí být příliš prudký (max. 50°C/min), aby nedošlo vlivem rozdílné rychlosti ohřevu vrstvy a substrátu, vzhledem k jejich hmotnostnímu rozdílu, ke vzniku pnutí a případnému poškození vrstvy.

3. **Vypalovací zóna**

Ve vypalovací zóně je udržována konstantní teplota, která je zvolena tak, aby pojivová složka tlusté vrstvy byla natavena, zatímco funkční složka zůstává v pevné fázi a jednotlivé částice tvořící funkční složku jsou sintrovány, organická složka je v této fázi spálena.

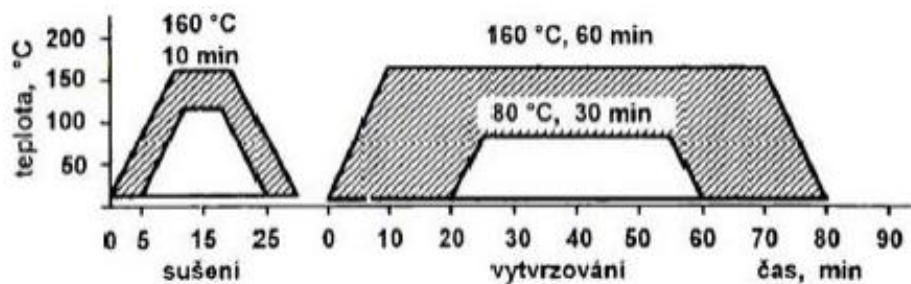
4. **Chladicí zóna**

Následuje postupné ochlazování substrátu s již vypálenou tlustou vrstvou, kde stejně jako u předeřevu je důležité, aby ochlazování probíhalo pozvolna.



Obr. 11: Teplotní profil výpalu tlustých vrstev ve čtyřzónové peci [5]

Jak již bylo zmíněno, na rozdíl od anorganických past jsou organické pasty pouze vytvrzovány. Vytvrzování pasty probíhá rovněž při určitém teplotním profilu ale při nižší teplotě (přibližně 200 °C). Při vytvrzování organické pasty dochází k přeměně organické složky této pasty. [4]



Obr. 12: Teplotní profil vytvrzování organické pasty [23]

## 2.6. Diagnostika natištěného motivu na desku plošných spojů

Protože výroba desek plošných spojů je technicky náročný proces, mohou se na deskách plošných spojů vyskytnout různé vady, jako jsou například nečistoty, nesprávně provedené vrtání, nepřesnosti vytvořeného motivu, zkratky, přerušené vodivé spojení motivu apod., které mohou ovlivnit nebo dokonce narušit výslednou funkčnost a spolehlivost desky plošných spojů. Proto je nutné do výrobního procesu zařadit testování a kontrolu vyráběných desek plošných spojů. Na deskách plošných spojů se provádí kontrola kvality osazení a pájení součástek, ale také diagnostika substrátů a plošných spojů.

Metody diagnostiky můžeme rozdělit na vizuální (optické), elektrické a pomocí kontrolních výbrusů. Metody testování tištěných motivů jsou shodné s metodami testování motivu vytvořeného klasickým způsobem. [17], [18], [19]

### 2.6.1. Optické metody testování

Základní metodou diagnostiky natištěného motivu je kontrola zaškoleným pracovníkem pomocí sledování prostým lidským okem, dílenskou lupou nebo mikroskopem, avšak tyto metody nelze považovat za spolehlivé, jelikož nelze vyloučit přehlédnutí závady vlivem únavy či nepozornosti pracovníka.

Další z možností optického testování je automatizace optické kontroly pomocí počítače zvané AOI (automatická optická kontrola), která funguje na principu porovnávání obrazu hotové desky snímané kamerou nebo soustavou kamer s předlohou, avšak rozhodovací proces nevykonává člověk ale počítač, který případně označí nevyhovující body na kontrolované desce. V závislosti na kvalitě kamer a softwarového vybavení AOI lze dosáhnout rozlišení i 10  $\mu\text{m}$ . Výhoda automatické optické metody spočívá ve zrychlení procesu kontroly a rovněž zvýšení úspěšnosti odhalení chyb oproti kontrole zaškoleným pracovníkem. [17], [18], [19]

Pro kontrolu desek plošných spojů je rovněž možné použít metody na principu infračervené termografie, rentgenu nebo laseru. [19]

### 2.6.2. Elektrické metody testování

Elektrické metody testování spočívají v měření elektrické vodivosti pomocí elektrických sond nebo jehlového pole mezi různými body na testovaném motivu, ale také v měření odezvy desky na vstupní signály. Těmito způsoby lze nalézt závady, jako jsou zkrat mezi vodivými cestami, přerušení vodivého spojení nebo osazení vadnou součástí. [20]

Další možností elektrického testování desek plošných spojů je tzv. Hipot test, kdy se dielektrikum desky zkouší vystavením vyššímu napětí, než je provozní napětí, nedojde-li k elektrickému průrazu, dielektrikum desky bude vyhovovat i pro provozní napětí. [20]

### 2.6.3. Kontrolní výbrusy

Destruktivní metodou testování desek plošných spojů jsou kontrolní výbrusy, které se provádí v problematických místech desek plošných spojů, jako jsou například otvory, ve kterých se kontroluje kvalita vrtání, znečištění stěn vrtaných otvorů, pokovení apod. Řez se zpravidla provádí v příčném směru desky plošných spojů. Vyhodnocení kontrolních výbrusů probíhá pod mikroskopem. [21]



Obr. 13: Kontrolní výbrus nanesené měděné vrstvy na substrát [29]



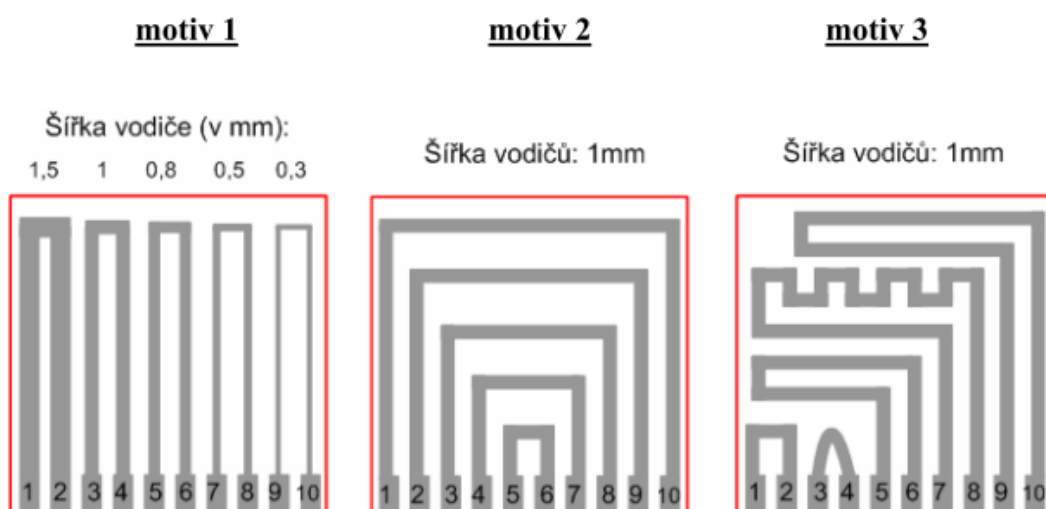
### 3. Příprava a měření vzorků tlustých vrstev

Tato část práce je věnována přípravě a měření vlastností vzorků tlustovrstvých struktur vytvořených z organických past pomocí ručního sítotisku.

#### 3.1. Příprava vzorků

Pro přípravu vzorků jsem využil ruční sítotiskový přístroj Uniprint s polypropylenovým sítím s hustotou 60-70 ok na cm<sup>2</sup> a s úhlem natočení síťoviny 30°. Testovací motivy byly realizovány z organických tlustovrstvých past na korundový substrát 96 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o rozměrech 25 x 25 mm. Jelikož byly použity organické pasty, pro přípravu vzorků by mohl být rovněž použit substrát FR-4 či jiné organické substráty, ty však v době přípravy vzorků nebyly k dispozici, proto byl zvolen pro realizaci vzorků dražší korundový substrát.

Pro účely tisku byly substráty vyrovnány do plat, které byly tvořeny dvěma řadami po šesti korundových destičkách. Destičky byly navzájem slepeny ze spodní strany pomocí lepicí pásky. Každé plato, čítající dvanáct korundových destiček, bylo potištěno třemi různými motivy, a každá destička v rámci plata byla očíslována. Rozmístění motivů na platě můžeme pozorovat na obr. 15. Pro tisk byly použity dvě stříbrné (CSP 3110D, Paron 910) a dvě grafitové (CSP 3225, Paron 920) organické pasty. Každou z past bylo potištěno pět plat, celkem bylo vytvořeno 240 vzorků (20 vzorků od jednoho motivu a od každé pasty).



Obr. 14: Natištěné motivy [4]

motiv 1		motiv 2		motiv 3	
Dráha mezi kontakty	Délka dráhy [mm]	Dráha mezi kontakty	Délka dráhy [mm]	Dráha mezi kontakty	Délka dráhy [mm]
1-2	41	1-10	63	1-2	10
3-4	41	2-9	50	3-4	8,5
5-6	41	3-8	36	5-6	40,5
7-8	41	4-7	23	7-8	61,5
9-10	41	5-6	11	9-10	76,5

Tab. 4: Délky jednotlivých cest měřených motivů, upraveno [4]

### 3.1.1. Průběh tisku

Nejprve jsem vložil podložky ve formě plata na pracovní plochu sítotiskového stroje a spustil vysavač připojený pod pracovní plochou sítotiskového zařízení, který zajišťuje pevné uchycení destiček pomocí podtlaku a zamezuje tak pohybu destiček při tisku.

Následně jsem nanesl na síto vedle motivu přiměřené množství pasty ve formě tenkého pruhu, jehož délka přibližně odpovídá šířce motivu.

Před samotným tiskem na připravené destičky bylo nejdříve nutné zajistit správný soutisk, tedy správné vyrovnaní motivu na destičce. Toto bylo provedeno pomocí kontrolního tisku na plastovou fólii napnutou v kovovém rámu a posuvu pracovní plochy sítotiskového stroje, na které jsou umístěny destičky a jejíž polohu lze posouvat pomocí tří šroubů tak, aby bylo docíleno toho, že se natištěný motiv na plastové fólii a destičky umístěné na pracovní ploše sítotiskového stroje překrývají. Následně je možné odstranit plastovou fólii a pohybem těrky přes motiv tam a zpět protlačit pastu skrz oka síta na podložku.

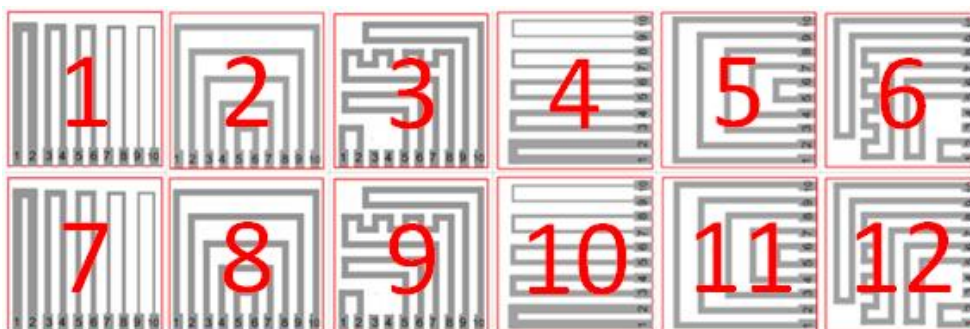
Po nanesení motivu jsem odklopil síto a vypnul vysavač a opatrně vyjmul plato s nanesenou vrstvou pasty a postup jsem opakoval s dalšími platy.

Při změně nanášené pasty je nutné důkladně vyčistit síto od předchozí pasty. Zde se projevuje poměrně značná nevýhoda sítotisku oproti šablonovému tisku, jelikož je poměrně obtížné odstranit zbytky předchozí pasty z ok síta a čím je hustota síta větší, tím je odstranění náročnější.

Po dokončení tisku byly natištěné vrstvy vytvrzeny pomocí laboratorní dávkovací pece s odporovým ohřevem. Doba a teplota vytvrzování se dle specifikace výrobců pro jednotlivé pasty lišila. Po vyjmutí vzorků z pece a jejich vychladnutí byla příprava vzorků dokončena.

Pasta	CSP 3110D	Paron 910	CSP 3225	Paron 920
Funkční složka pasty	Ag		C	
Viskozita [Pa.s]	15±5	15	20±5	20
Obsah pevných částic [wt%]	75±2	neuveďeno	42±2	neuveďeno
Hrúbost zrna [ $\mu\text{m}$ ]	< 5	neuveďeno	< 10	neuveďeno
Rezistivita [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]	$< 5 \cdot 10^{-5}$	$(2,25 - 7,5) \cdot 10^{-5}$	< 0,1	0,06
Odpor na čtverec [ $\Omega/\square$ ]	0,05	0,015 – 0,05	70	40
Doba, teplota vytvrzování	20 min, 130 °C	30-60 min, 130 °C	30 min, 130 °C	30-60 min, 130 °C
Doporučená hustota síta [mesh]	180-400	neuveďeno	180-250	neuveďeno

Tab. 5: Vybrané vlastnosti použitých past



Obr. 15: Rozmístění motivů na platě a očíslování destiček v rámci plata

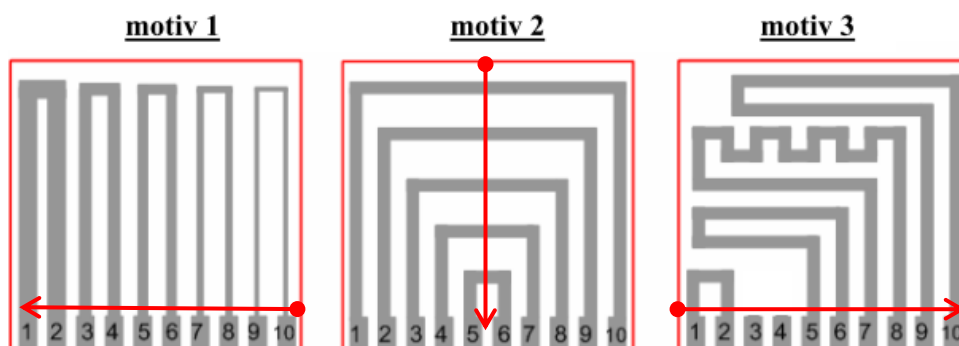
### 3.2. Měření odporu vrstvy

Odpor nanesené vrstvy byl měřen pomocí dvoubodové metody realizované měřicím přístrojem KEYSIGHT 34470A. Měření odporu probíhalo přiložením měřicích sond na kontaktní plošky jednotlivých vodivých cest.

Dvoubodová metoda může být zatížena poměrně velkou chybou měření, způsobenou přechodovým odporem mezi měřicí sondou a kontaktní ploškou vrstvy a odporem přívodních kabelů. Tato chyba měření je významná zejména při měření malých odporů, což v našem případě nastalo při měření odporu vodivých past na bázi stříbra, kde se odpor jednotlivých drah pohyboval v řádu jednotek ohmů. Tato chyba měření byla alespoň částečně korigována odečtením přechodového odporu  $0,4 \Omega$  mezi sondami a kontaktními ploškami. Naopak u měření odporu past na bázi grafitu bylo možné vzhledem k velkému odporu měřených vrstev (řádově  $k\Omega$ ) tuto chybu měření zanedbat.

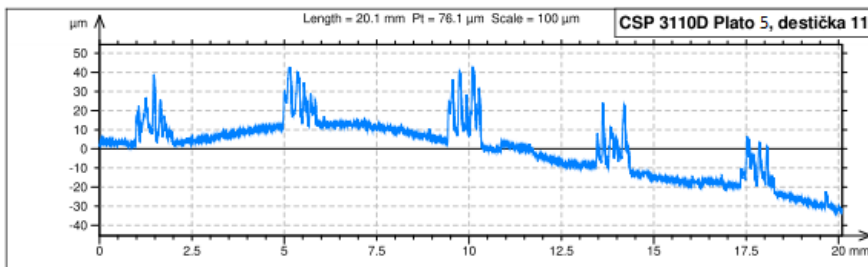
### 3.3. Měření tloušťky vrstvy a šířky drah motivu

K měření tloušťky nanesené vrstvy a šířky vodivých drah mezi kontakty byl použit měřič profilu Form Talysurf Intra od společnosti Taylor Hobson s udávaným rozlišením 3 nm při měření v rozsahu 0,2 mm. Měření tloušťky vrstvy bylo provedeno přes celou šířku destičky vždy ve směru dle obr. 16.

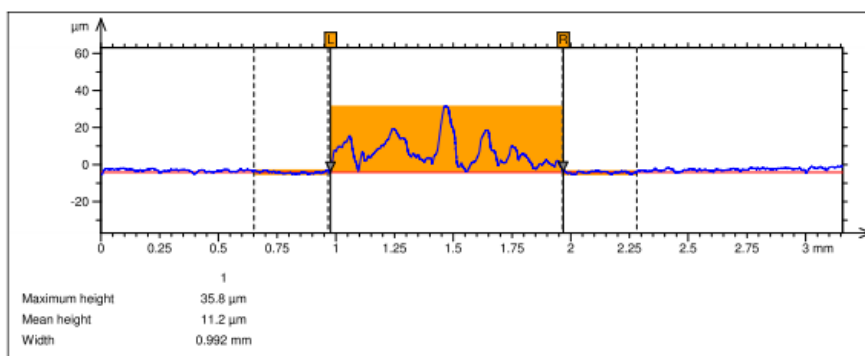
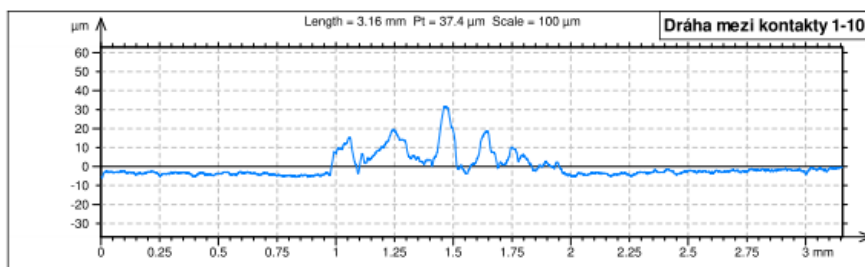


Obr. 16: Měření tloušťky vrstvy a šířky drah motivu

Následně byl získaný profil (viz. obr. 17) zpracován pomocí programu TalyProfile Gold a jeho nástroje měření skoku, který používal dva referenční úseky okolo měřené dráhy. Takto byla změřena průměrná tloušťka dráhy a její šířka. Při měření motivů 1 a 3 byla jedna vodivá dráha změřena na dvou místech, výsledná tloušťka a šířka dráhy je tedy průměrnou hodnotou z těchto změřených hodnot. Příklad měření lze pozorovat na obr. 18.



Obr. 17: Změřený profil pomocí měřiče profilu



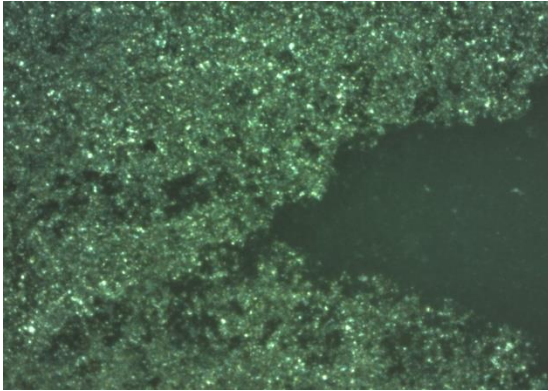
Obr. 18: Příklad analýzy profilu pomocí programu TalyProfile Gold

Z obrázků č. 17 a č. 18 je patrné, že nanosená vrstva má poměrně nerovnoměrnou tloušťku a její povrch je velmi členitý. Rovněž korundová destička, která byla použita jako substrát pro tlustou vrstvu, byla často značně prohnutá. Tento fakt komplikoval průběh měření, zvláště když bylo prohnutí destičky větší, než byl rozsah měřiče profilu (talystepu), potom bylo nutné profil motivu zaznamenat po částech. Prohnutí destičky se také může projevit na přesnosti naměřených hodnot, avšak tento negativní vliv je možné částečně eliminovat použitím dvou referenčních úseků okolo měřené dráhy.

Z časových důvodů bylo měření tloušťky vrstvy a šířky drah motivu provedeno pouze u části vytvořených vzorků, a to vždy u vzorků s motivem 1 a 2 ze dvou plat, a vzorky s motivem 3 z jednoho platu pro každou pastu. Celkem tedy bylo provedeno měření na jedné třetině vzorků (80).

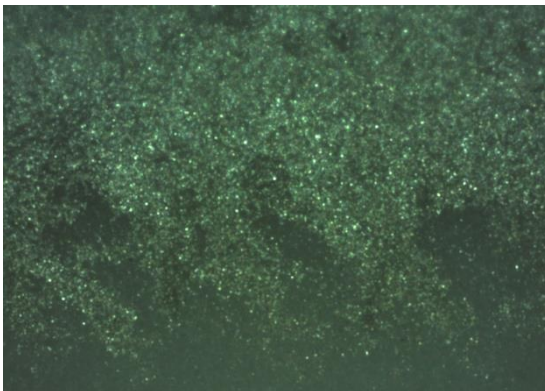
### 3.4. Kontrola naneseného motivu

Kontrola nanesené vrstvy pasty probíhala pod optickým přístrojem umožňující 100 násobné zvětšení. Toho bylo využito k ověření změřených rozměrů drah a ke zkoumání defektů nanesených tlustých vrstev, které by pouhým okem nebyly patrné. Při optické kontrole se ukázalo, že vrstvy vykazovaly několik defektů, které se poměrně často opakovaly vzhledem k tomu, že v průběhu tisku nebyly upravovány jeho podmínky (odtrh, rychlost pohybu těrky, apod.). Následující obrázky zobrazují nejčastější vady.



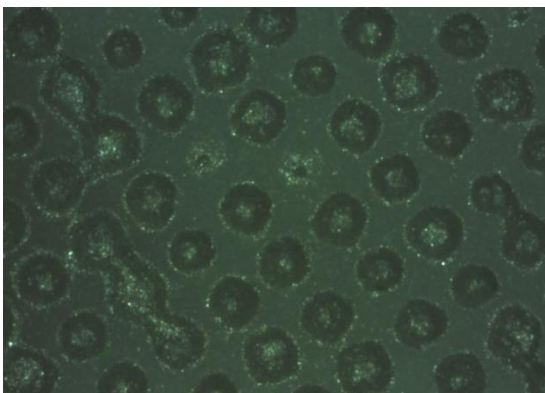
**Obr. 19: Slité kontaktní plošky**

Na obr. č. 19 můžeme pozorovat slité kontaktní plošky drah stříbrné pasty Paron 910. Toto vodivé spojení kontaktních plošek znemožňuje měření odporu vodivé dráhy.



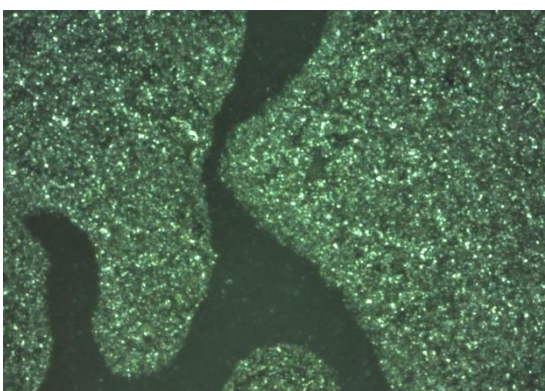
**Obr. 20: Rozlitá pasta vlivem velkého množství pasty**

Na obr. č 20 lze ve spodní části obrázku vidět rozlití pasty vlivem nanesení příliš velkého množství pasty.



**Obr. 21: Neslitá pasta - ostrůvky**

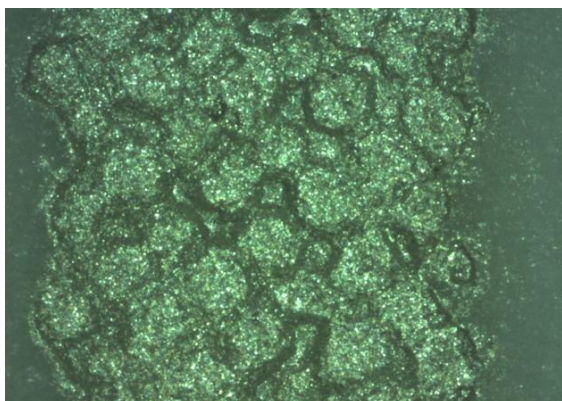
Na obr. č. 21 můžeme pozorovat ostrůvky, které vznikly naopak v důsledku nanesení příliš malého množství pasty. Pasta se tak vlivem viskozity neslila do rovnoměrné vrstvy.



**Obr. 22: Přerušení vodivé cesty vlivem ucpání ok síta**

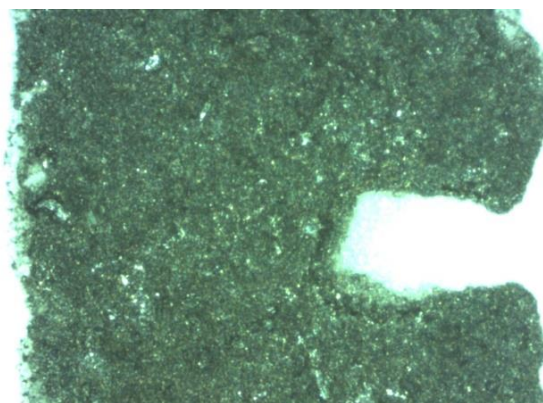
Na obr. č. 22 vidíme pastu, která se sice slila, avšak vlivem ucpání některých ok síta došlo k přerušení vodivé cesty.





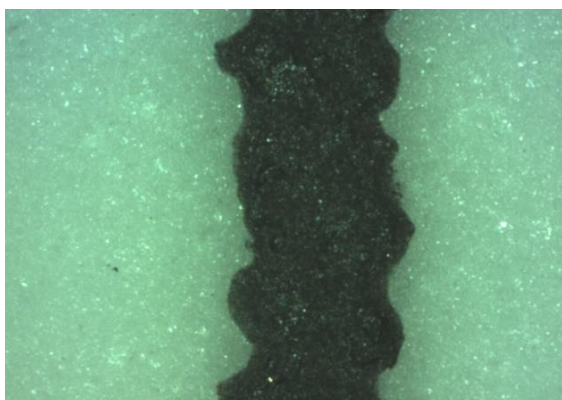
Obr. 23: Nerovný povrch a okraj vodivé dráhy

Na obr. č. 23 můžeme pozorovat nerovný povrch a okraj vodivé dráhy realizované pomocí stříbrné pasty CSP 3110D. V tomto případě pravděpodobně došlo k nanesení většího množství pasty, než na obr. č. 21, avšak nanesené množství je stále nedostatečné pro rovnoměrné slití pasty. Vliv na kvalitu povrchu má rovněž největší viskozita pasty a obsah funkčních částic z použitých past.



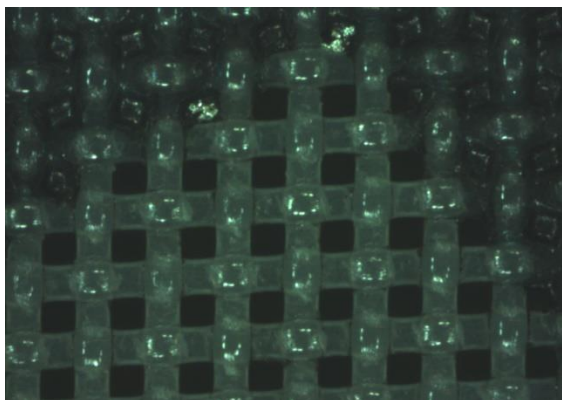
Obr. 24: Zúžení dráhy vlivem ucpání oka síta

Na obr. č. 24 lze vidět zúžení vodivé cesty vlivem ucpání oka síta. Toto zúžení vodivé cesty zvyšuje odpor dráhy. Na obrázku je také patrné, že povrch uhlíkové pasty je hladší než u stříbrných past.



Obr. 25: Nerovný okraj dráhy

Na obr. č. 25 můžeme pozorovat nerovný okraj dráhy šířky 0,3 mm u pasty Paron 920. Dle [28] materiálu výrobce této pasty Changsung to může být způsobeno příliš vysokým tlakem na těrku při nanášení pasty, příliš vysokou viskozitou pasty nebo velkou vzdáleností síta od podložky. Rovněž mohlo mít vliv použití síta s nižší hustotou ok než je hodnota doporučená výrobcem pasty.



Obr. 26: Struktura síta

Optickým přístrojem bylo rovněž prohlédnuto i síto. Na obr. č. 26 vidíme strukturu síta. V horních okrajích obrázku je rovněž patrné zamaskování ok síta, čímž je vytvořen motiv na sítu. V horní části obrázku je rovněž vidět ucpání některých ok stříbrnou pastou. Měřením bylo zjištěno, že tloušťka vláken síta je 70  $\mu\text{m}$  a šířka ok síta je 80  $\mu\text{m}$ .

### 3.5. Vyhodnocení měření

Vytvořené vzorky byly podrobeny měření a zkoumání několika parametrů. Nejprve byla u vzorků provedena vizuální kontrola, poté měření odporu jednotlivých drah mezi kontakty podle bodu 3.2, následně bylo provedeno měření tloušťky vrstvy a šířky drah podle bodu 3.3. Tato kapitola se zabývá vyhodnocením naměřených hodnot, přičemž veškeré naměřené hodnoty se z důvodu velkého rozsahu budou nacházet ve formě tabulek v příloze č. 1-4 této práce.

#### 3.5.1. Počet aktivních cest mezi kontakty

Jak již bylo dříve zmíněno, bylo vytvořeno celkem pro každou pastu 60 vzorků, které obsahovaly 280 drah mezi jednotlivými kontakty, celkem tedy bylo vytvořeno 1120 drah. Některé dráhy však nebyly pro jejich přerušení, nebo naopak slití vhodné pro měření odporu, jelikož by došlo k nežádoucímu ovlivnění měření, a tak byly z měření vyloučeny. Dále byly rovněž vyřazeny dráhy, které sice při vizuální kontrole nevykazovaly viditelné vady, které by byly překážkou pro měření, avšak naměřená hodnota odporu byla značně odlišná od předpokládané hodnoty, ať už vlivem nesprávné tloušťky vrstvy, nebo zúžení dráhy. Počet drah, které nebyly vyřazeny, byl pro účely srovnání jednotlivých past vnesen do tabulky č. 6.

Pasta	Funkční složka pasty	Celkem vytvořeno drah	Počet měřitelných drah		Destičky bez vady		Průměrný počet defektních drah na destičce
			Absolutně	[%]	Absolutně	[%]	
CSP 3110D	Ag	280	193	68,9	25	41,7	2,48
Paron 910			191	68,2	25	41,7	2,54
CSP 3225	C		262	93,6	42	70,0	1,00
Paron 920			252	90,0	35	58,3	1,12
<b>Celkem</b>		<b>1120</b>	<b>898</b>	<b>80,2</b>	<b>127</b>	<b>52,9</b>	<b>1,96</b>

Tab. 6: Porovnání past z hlediska počtu aktivních drah

Z tabulky č. 6 je patrné, že z celkového počtu 1120 drah mezi kontakty mělo alespoň přibližně požadované vlastnosti 898, tedy 80,2 % z celkového počtu vodivých cest mezi kontakty. Pokud bychom ale posuzovali zmetkovitost tištěných vrstev podle toho, u kolika vzorků byly bezchybně vytvořeny všechny vodivé cesty mezi kontakty, pak bychom zjistili, že u téměř 50 % destiček nebyla správně natištěna alespoň 1 vodivá dráha. To by v případě průmyslového využití představovalo značný problém, avšak je nutné si uvědomit, že se jedná o experimentální výrobu pomocí ručního zařízení, jehož síto nebylo vzhledem k četnému využívání při výuce v ideálním stavu a během tisku nedocházelo k úpravě podmínek tisku tak, aby bylo dosaženo lepšího výsledku tisku.

V tabulce č. 6 můžeme rovněž pozorovat, že pasty, jejichž funkční složkou je uhlík, vykazovaly nižší počet defektních drah, než stříbrné pasty, to mohlo být způsobeno vyšší viskozitou stříbrných past, která je dána větším podílem pevných částic, čímž se stávají náchylnější na přerušení vodivé dráhy v důsledku ucpání oka síta.

### 3.5.2. Vyhodnocení měření tloušťky a šířky drah motivu

Z měření tloušťky a šířky drah motivu vyplývá, že pasta CSP 3110D má téměř dvojnásobnou průměrnou tloušťku vrstvy než ostatní pasty a směrodatná odchylka tlouštěk jednotlivých drah pasty CSP 3110D je větší než u ostatních past. Zároveň tato pasta vykazuje téměř ve všech motivech menší šířku dráhy průměrně o 0,01 mm, než je předpokládaná šířka dráhy, zatímco u ostatních past je situace až na několik výjimek opačná a dráhy jsou širší v průměru o 0,03 mm. Toto může být způsobeno tím, že pasta CSP 3110D má ze všech použitých past nejvyšší viskozitu a obsah funkčních částic.

Ze změřených hodnot tloušťky vrstvy a z vypočtených hodnot odporu na čtverec jsem pro jednotlivé pasty vypočetl průměrnou hodnotu rezistivity za účelem porovnání zjištěných hodnot s údaji výrobce. Přestože použité pasty byly starší než je deklarovaná doba použitelnosti od výrobce, tak až na pastu CSP 3110D vypočtená rezistivita odpovídala údajům od výrobců past. U pasty CSP 3110D byla naměřená rezistivita vyšší, pravděpodobně vlivem vyšší citlivosti na stáří pasty díky vysokému obsahu funkčních částic a vlivem velké členitosti povrchu vrstev vytvořených z této pasty.

Pasta	Funkční složka pasty	Průměrná tloušťka vrstvy [μm]	Průměrná odchylka [μm]	Směrodatná odchylka [μm]	Rezistivita ρ [Ω.cm]
CSP 3110D	Ag	13,2	2,96	3,80	$8,96 \cdot 10^{-5}$
Paron 910		7,65	2,07	2,61	$4,05 \cdot 10^{-5}$
CSP 3225	C	7,20	1,74	2,48	$4,86 \cdot 10^{-2}$
Paron 920		7,88	1,90	2,72	$4,50 \cdot 10^{-2}$

Tab. 7: Průměrná tloušťka vrstvy u jednotlivých past

Pasta	Průměrná šířka dráhy [mm]				
	Dráha 1-2	Dráha 3-4	Dráha 5-6	Dráha 7-8	Dráha 9-10
CSP 3110D	1,48	0,968	0,785	0,443	0,291
Paron 910	1,59	1,05	0,826	0,507	0,312
CSP 3225	1,52	1,04	0,798	0,509	0,288
Paron 920	1,55	1,04	0,821	0,488	0,317

Tab. 8: Motiv 1- průměrná šířka drah

Pasta	Průměrná šířka dráhy [mm]				
	Dráha 1-10	Dráha 2-9	Dráha 3-8	Dráha 4-7	Dráha 5-6
CSP 3110D	1,01	0,968	0,996	0,989	0,970
Paron 910	1,04	1,00	1,04	1,04	1,03
CSP 3225	1,02	0,990	1,02	1,00	0,989
Paron 920	1,03	1,02	1,03	1,02	1,07

Tab. 9: Motiv 2- průměrná šířka drah

Pasta	Průměrná šířka dráhy [mm]			
	Dráha 1-2	Dráha 5-6	Dráha 7-8	Dráha 9-10
CSP 3110D	1,02	0,995	1,01	1,04
Paron 910	1,01	1,05	1,08	1,03
CSP 3225	1,08	1,08	1,10	1,07
Paron 920	1,01	1,01	1,01	0,961

Tab. 10: Motiv 3 - průměrná šířka drah



### 3.5.3. Vliv rozměrů vodivé dráhy na její odpor a odpor na čtverec

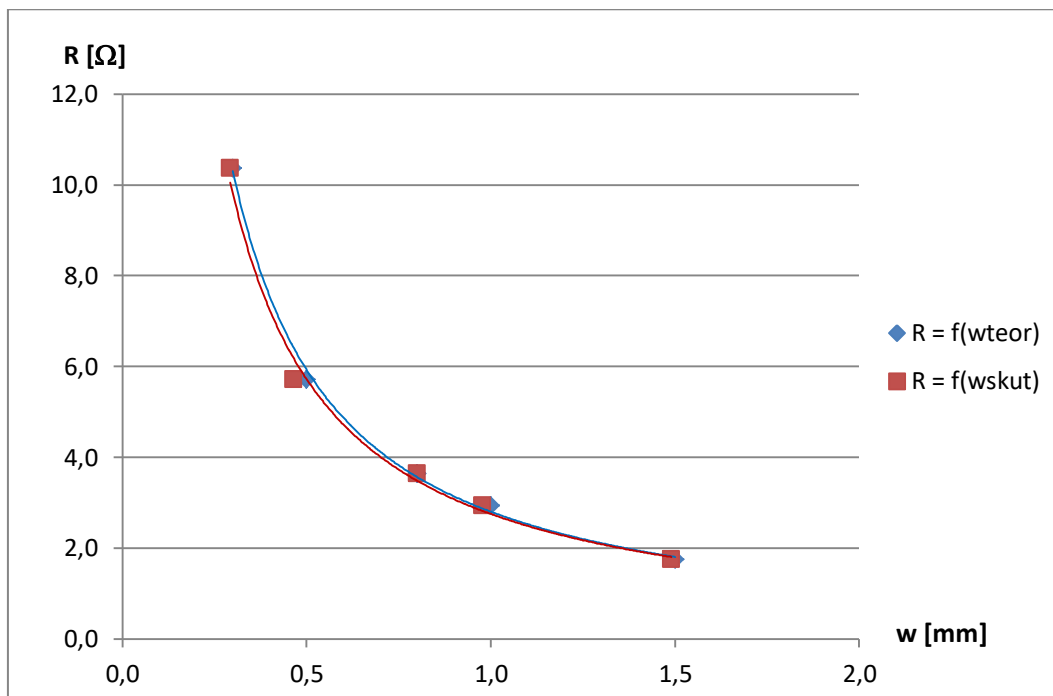
Ze vzorce (3) pro výpočet odporu vrstvy  $R = R_{\square} \frac{l}{w}$ , kde R je naměřený odpor, l je délka dráhy a w je její šířka, můžeme zavést teoretický předpoklad, že odpor vodivé dráhy je nepřímo úměrný její šířce a přímo úměrný její délce. Při zvětšování šířky dráhy a při zachování její délky by tedy měl změřený odpor klesat. Naopak při zvětšování délky dráhy a při zachování její šířky by se měl změřený odpor naopak zvětšovat.

Podobně lze položit předpoklad pro změnu odporu na čtverec v závislosti na šířce vodivé dráhy, kde do vzorce (3) dosadíme za odpor  $R = \frac{\rho l}{wh}$ , kde  $\rho$  je rezistivita, l je délka dráhy, w je její šířka a h je její tloušťka. Potom docházíme ke vztahu, že  $R_{\square} = \frac{\rho}{h}$ . Odpor na čtverec je tedy závislý přímo úměrně na rezistivitě pasty a nepřímo úměrně na tloušťce vrstvy, avšak na délce ani šířce dráhy nezávisí.

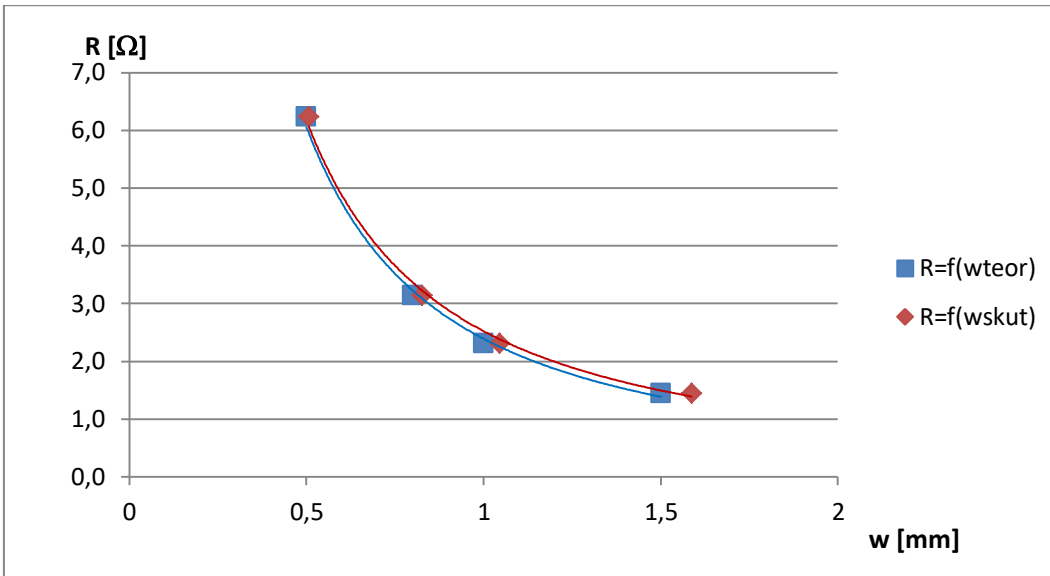
Z výše uvedených vzorců rovněž vyplývá, že velikost odporu vodivé dráhy je přímo úměrná rezistivitě a nepřímo úměrná tloušťce vrstvy.

#### 3.5.3.1. Závislost odporu na šířce dráhy

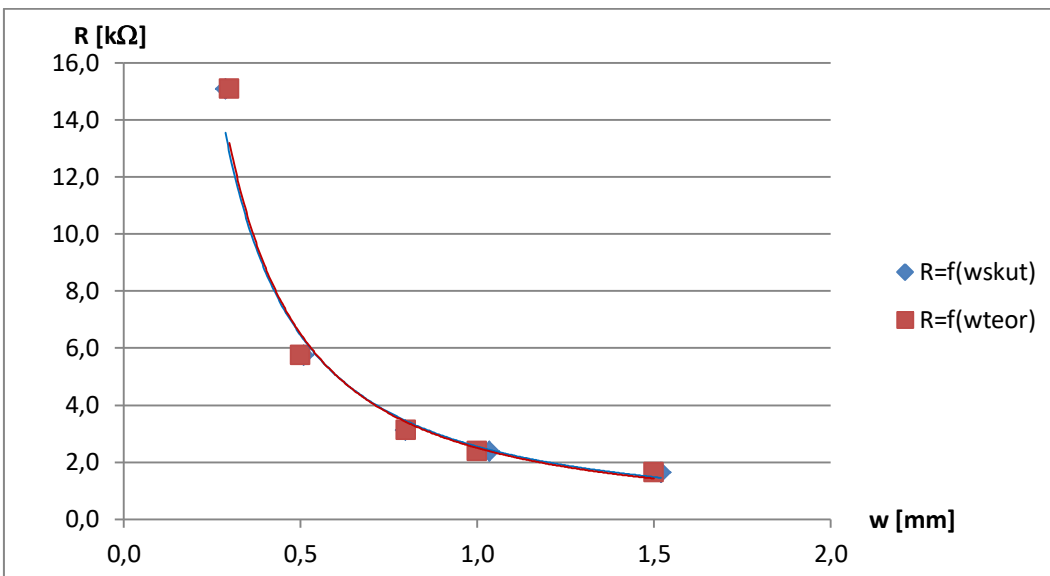
Pro ověření předpokladu, že naměřený odpor se vzrůstající šířkou dráhy bude klesat, byl využit motiv č. 1, který disponuje dráhami o různé šířce, avšak všechny dráhy jsou stejné délky. Do grafů č. 1-4 byla vynesena závislost průměrné hodnoty odporu jednotlivých drah na předpokládané šířce dráhy ( $w_{\text{teor}}$ ) a na průměrné hodnotě změřených šířek drah ( $w_{\text{skut}}$ ) pro všechny měřené pasty. Z grafů je patrné, že byl tento teoretický předpoklad splněn.



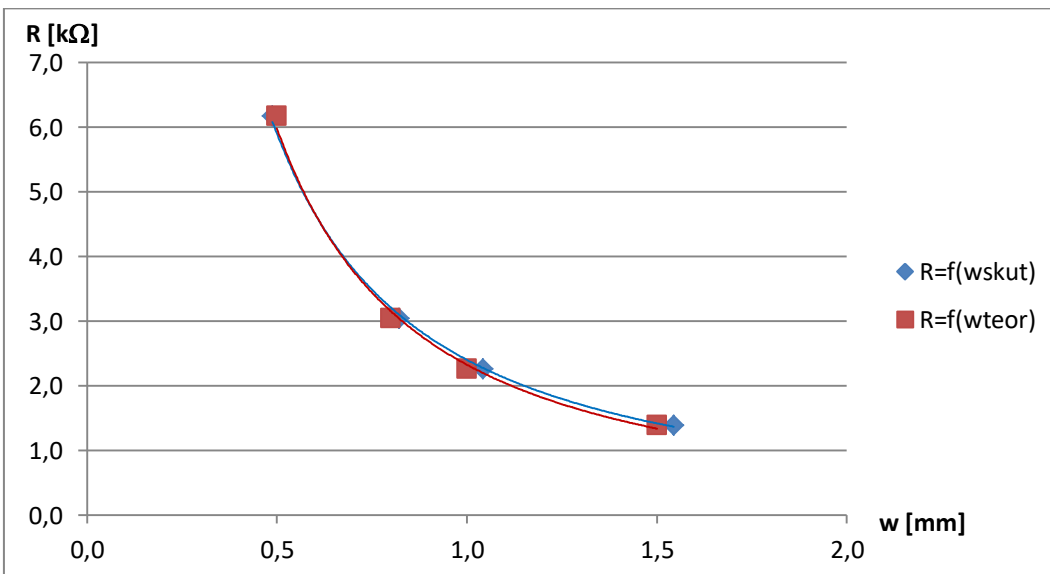
Graf 1: CSP 3110D – Závislost odporu na teoretické i reálné šířce dráhy



Graf 2: Paron 910 – Závislost odporu na teoretické i reálné šířce dráhy



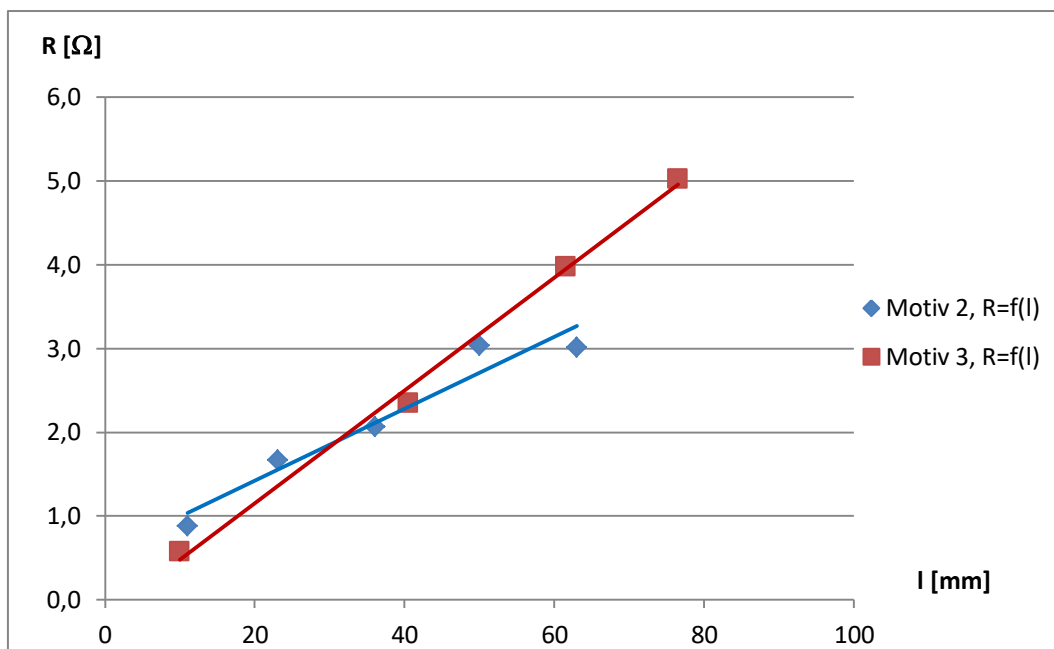
Graf 3: CSP 3225 – Závislost odporu na teoretické i reálné šířce dráhy



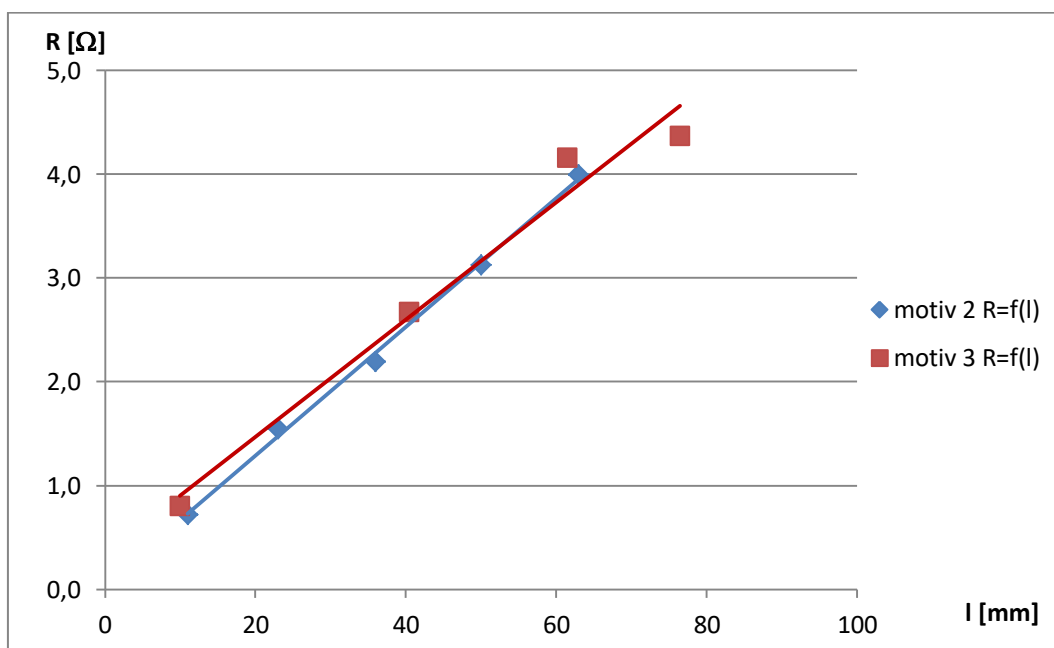
Graf 4: Paron 920 – Závislost odporu na teoretické i reálné šířce vrstvy

### 3.5.3.2. Závislost odporu na délce dráhy

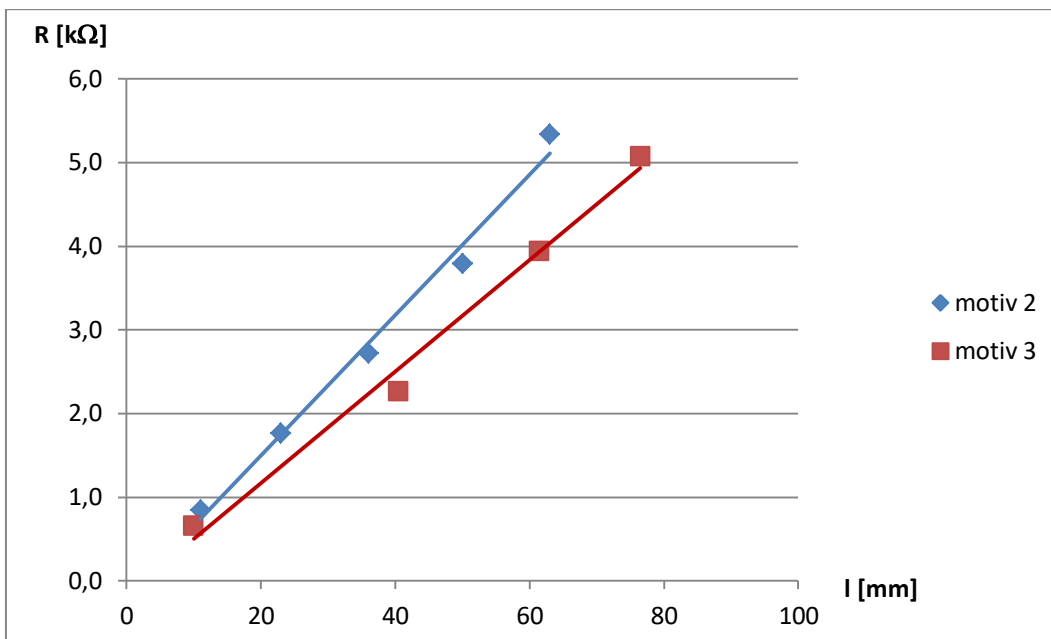
Pro ověření předpokladu, že se s rostoucí délkou dráhy bude naměřená hodnota odporu zvyšovat, byly využity motivy č. 2 a č. 3. Tyto motivy se vyznačují tím, že všechny dráhy v těchto motivech mají stejnou šířku a jednotlivé dráhy se liší pouze svou délkou. Do grafů č. 5-8 byly vyneseny průměrné hodnoty odporu jednotlivých drah v závislosti na jejich délce pro všechny měřené pasty. Z grafů je patrné, že tento předpoklad byl rovněž splněn. V grafech také můžeme pozorovat, že pro každý motiv je různý sklon závislosti odporu na délce dráhy, to může být způsobeno kombinací nepřesnosti měření, nerovnoměrností tloušťky vrstvy a nehomogenitou vrstvy.



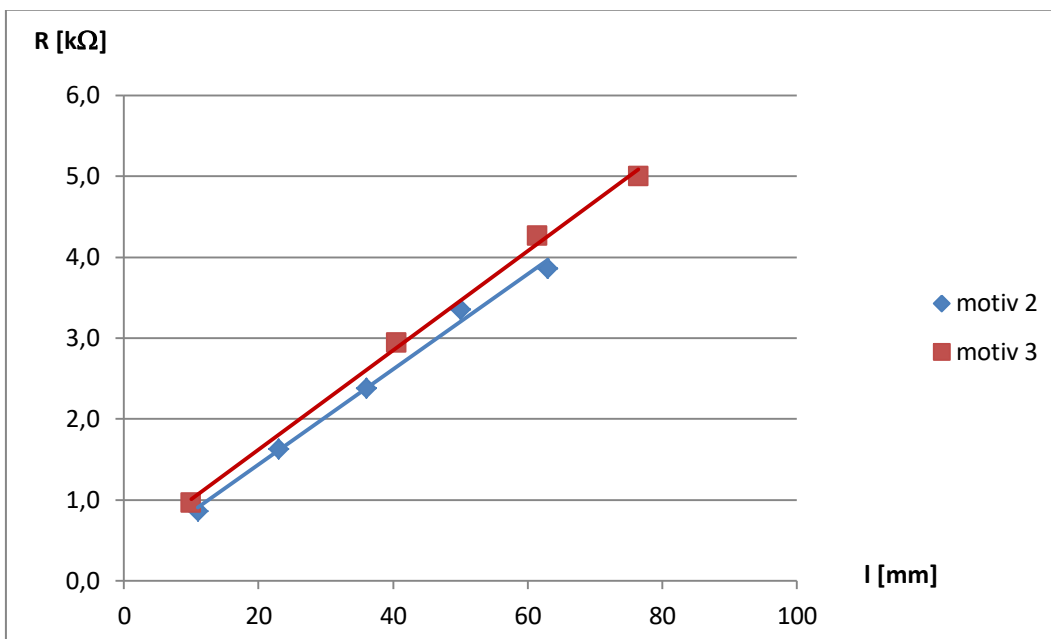
Graf 5: CSP 3110D – Závislost odporu na délce dráhy



Graf 6: Paron 910 – Závislost odporu na délce dráhy



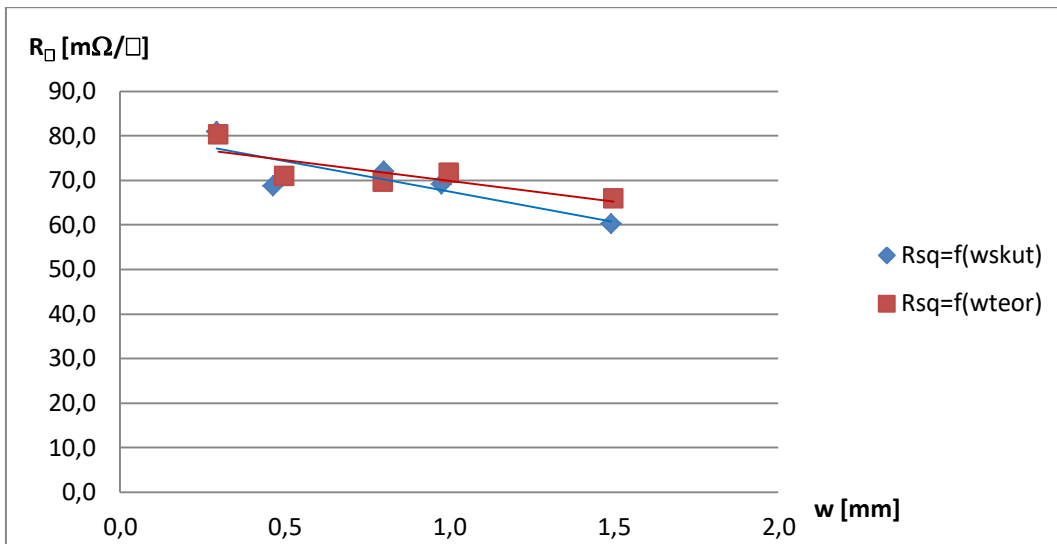
Graf 7: CSP 3225 – Závislost odporu na délce dráhy



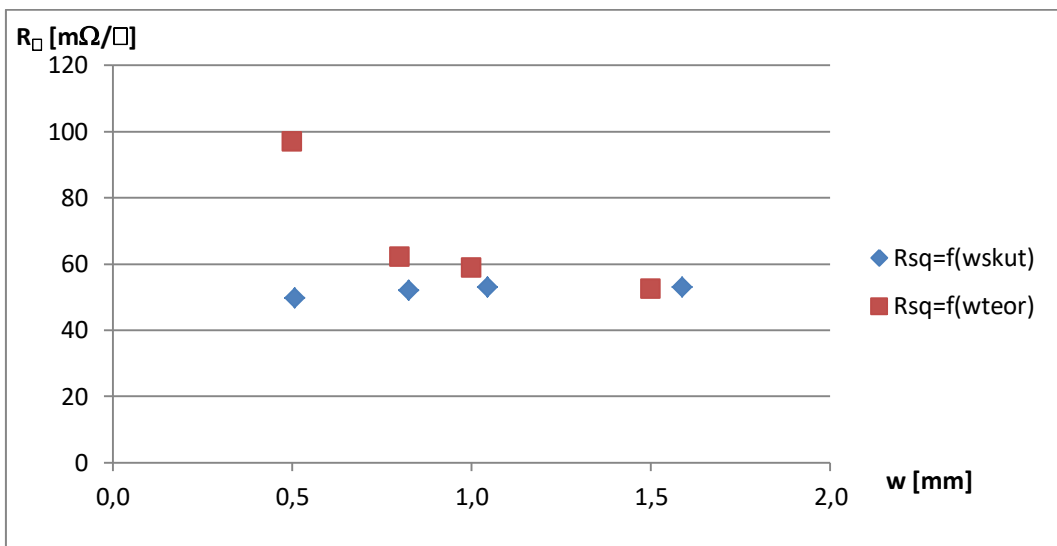
Graf 8: Paron 920 – Závislost odporu na délce dráhy

### 3.5.3.3. Závislost odporu na čtverec na šířce dráhy

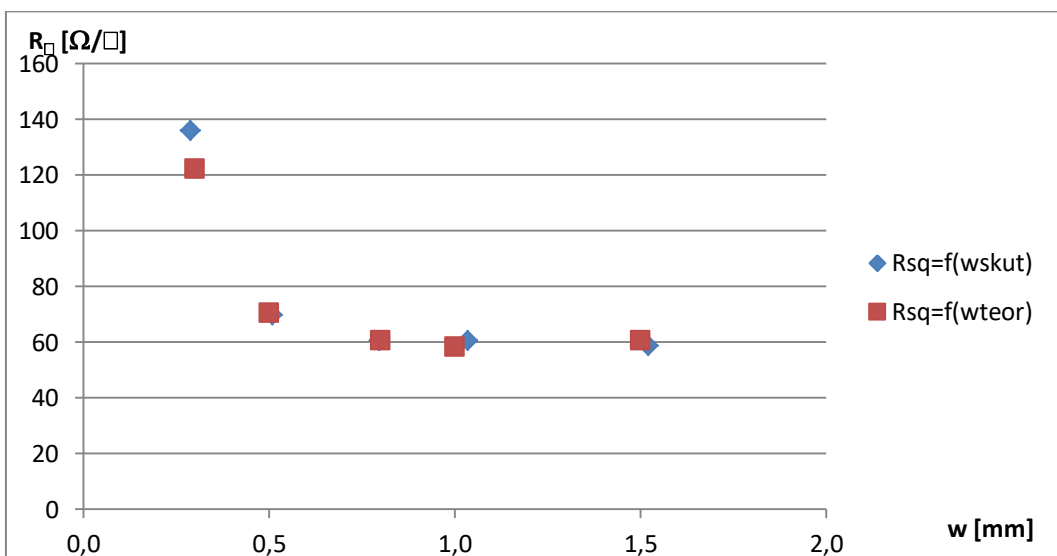
Pro ověření předpokladu, že odpor na čtverec by měl být nezávislý na šířce vodivé dráhy, byl opět použit motiv č. 1. Do grafů č. 9-12 byly vyneseny průměrné hodnoty odporu na čtverec jednotlivých drah, vypočtené ze změřené šířky a z předpokládané šířky dráhy v závislosti na změřené šířce dráhy resp. předpokládané šířce dráhy. Z grafů je patrné, že velikost odporu na čtverec se v závislosti na šířce mění nejvíce v úzkých drahách, u širších drah se odpor na čtverec se změnou šířky dráhy příliš nemění. To může být způsobeno nerovnoměrnou tloušťkou a šířkou vrstvy a nehomogenitami, které se projeví nejvíce právě u nejužších drah. Z měření šířky drah totiž vyplývá, že vodivá dráha je v průměru přibližně o 0,03 mm širší nezávisle na předpokládané šířce dráhy. Procentuální změna skutečné šířky oproti teoretické šířce dráhy je tak největší právě u nejužších drah.



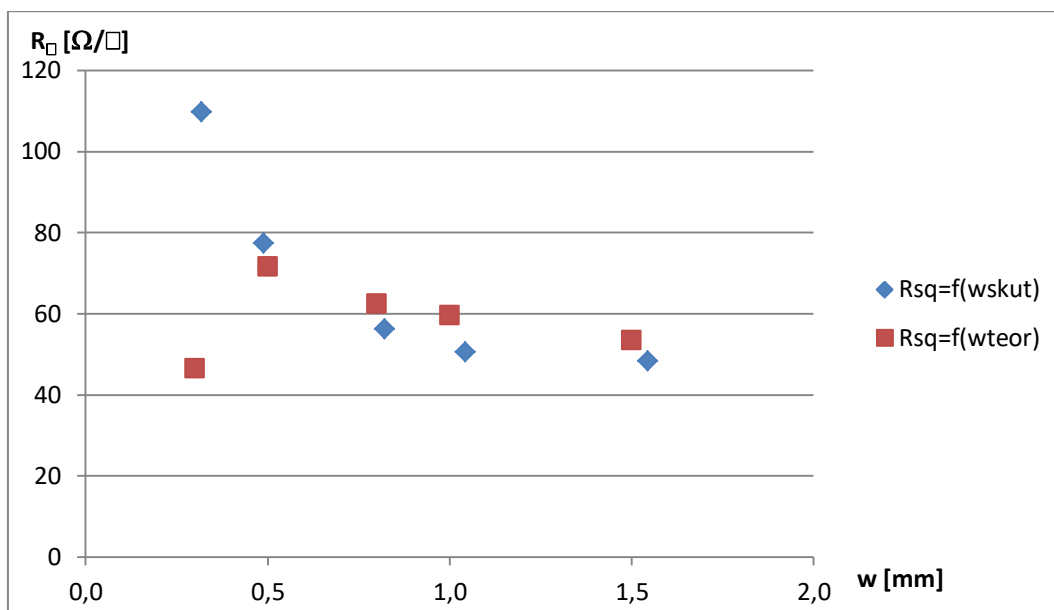
Graf 9: CSP 3110D – Závislost odporu na čtverec na šířce dráhy



Graf 10: Paron 910 – Závislost odporu na čtverec na šířce dráhy



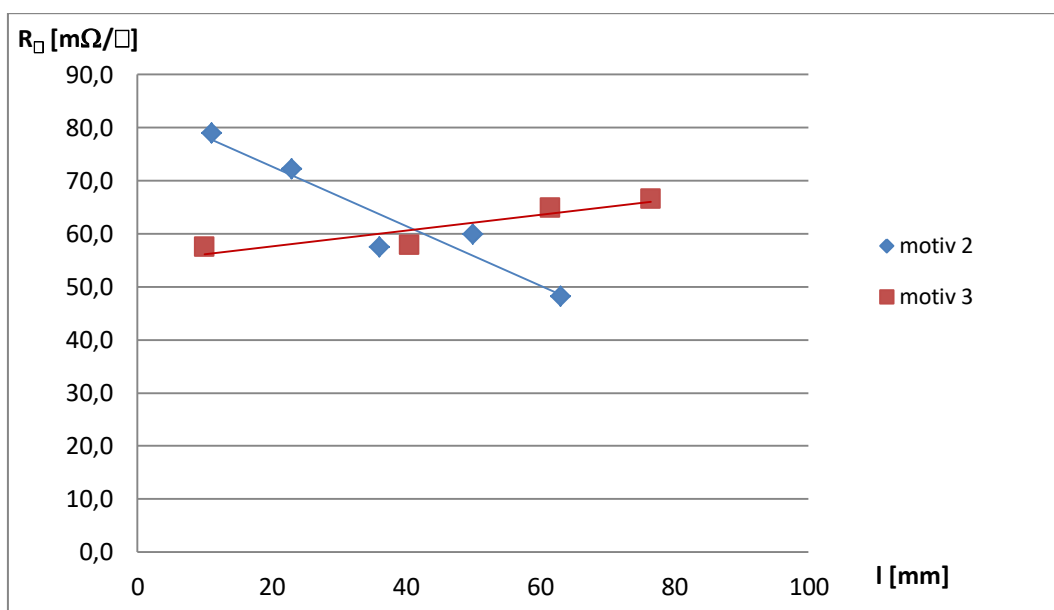
Graf 11: CSP 3225 – Závislost odporu na čtverec na šířce dráhy



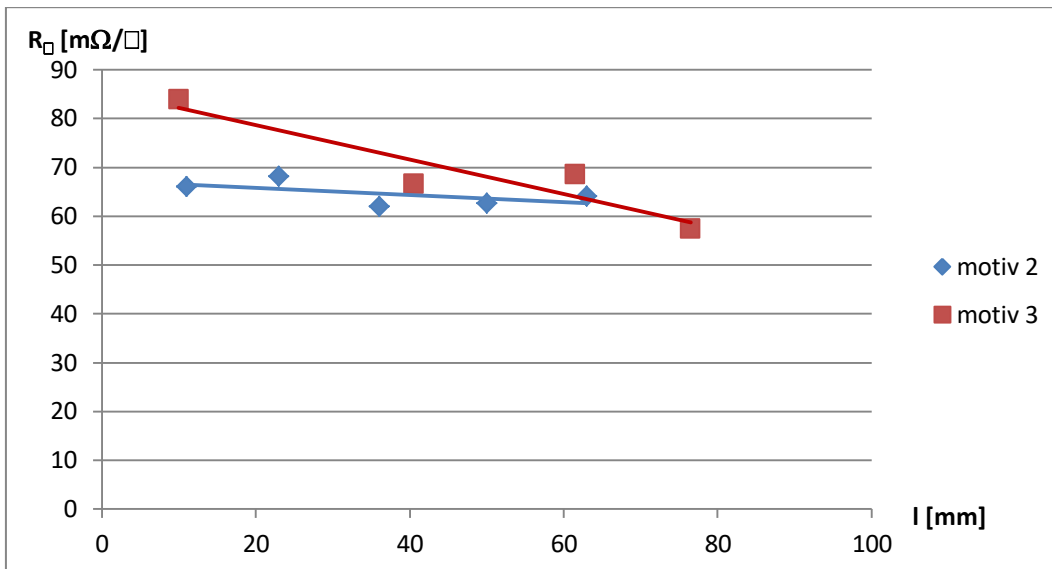
Graf 12: Paron 920 – Závislost odporu na čtverec na šířce dráhy

### 3.5.3.4. Závislost odporu na čtverec na délce dráhy

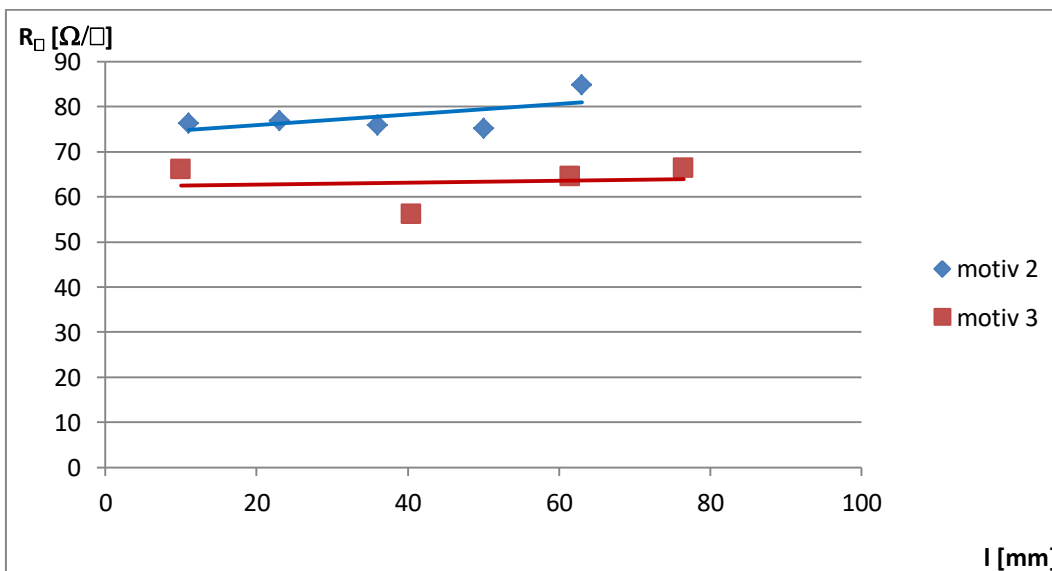
Pro ověření předpokladu, že odpor na čtverec by neměl být závislý na délce dráhy, byly použity motivy č. 2 a č. 3. Do grafů č. 13-16 byly vyneseny průměrné hodnoty odporu na čtverec pro jednotlivé dráhy vypočítané s využitím průměrné změřené šířky, předpokládané šířky a předpokládané délky drah v závislosti na délce dráhy. Z grafů je patrné, že se odpor na čtverec mění v závislosti na délce dráhy. V polovině případů velikost odporu na čtverec s délkou dráhy klesá, v jednom případě velikost odporu na čtverec s délkou dráhy roste a ve třech případech se velikost odporu na čtverec nemění. Jelikož výsledky nejsou jednoznačné, je poměrně obtížné z nich vyvodit jasný závěr, ale zdá se, že se v některých případech projevují nehomogenity vrstvy tak, že vypočítaný odpor na čtverec roste s délkou dráhy, naopak v některých případech se projevují opačně a v některých případech se vliv nehomogenit navzájem vyruší.



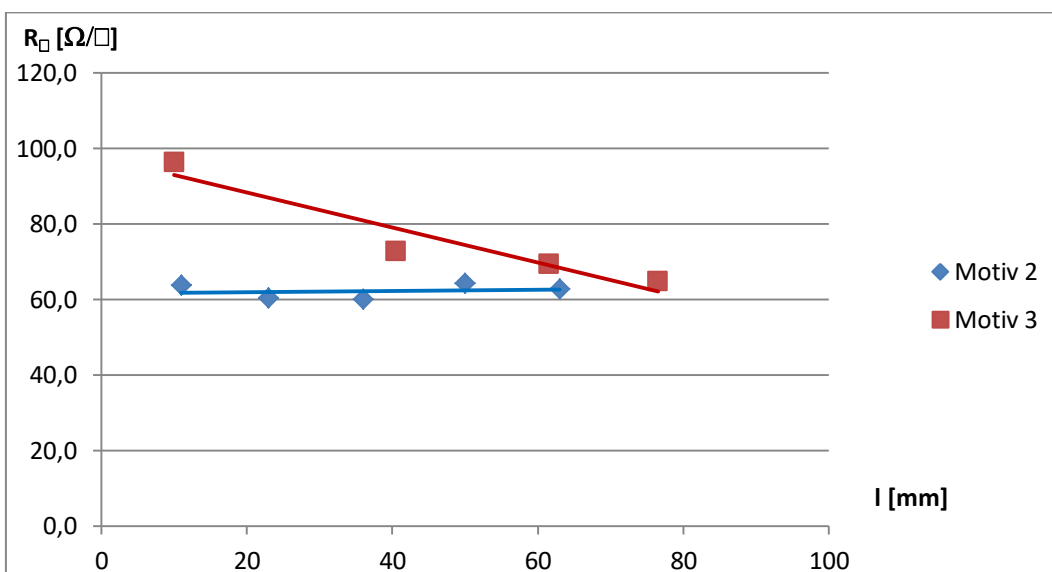
Graf 13: CSP 3110D – Závislost odporu na čtverec na délce dráhy



Graf 14: Paron 910: Závislost odporu na čtverec na délce dráhy



Graf 15: CSP 3225 – Závislost odporu na čtverec na délce dráhy



Graf 16: Paron 920 – Závislost odporu na čtverec na délce dráhy

## **4. Porovnání výrobních nákladů na výrobu DPS klasickou metodou a pomocí tlustých vrstev**

V této části bakalářské práce jsou porovnávány výrobní náklady na výrobu DPS bez osazení součástkami. Pro účely porovnávání výrobních nákladů jednotlivých technologií výroby jsem zvolil jednovrstvý plošný spoj a to z toho důvodu, že výroba plošných spojů je velmi složitý proces a náročnost tohoto procesu roste i s komplikovaností vyráběného plošného spoje, proto by bylo porovnání výrobních nákladů poměrně obtížné. Zároveň každá DPS je navrhována individuálně a liší se tedy od sebe navzájem počtem vrstev, vodivých otvorů, motivem, povrchovou úpravou a dalšími parametry, které samozřejmě ovlivňují výrobní cenu daného plošného spoje. Na základě reálných údajů získaných od společností, které se zabývají výrobou desek plošných spojů pomocí fotolitografických procesů (Printed s.r.o.) a tiskem tlustých vrstev (Elceram a.s.), jsem provedl kalkulaci nákladů na výrobu jednovrstvých DPS vyráběných s využitím těchto technologií.

### **4.1. Stanovení výrobních nákladů a zhodnocení investice**

Pro stanovení výrobních nákladů a zhodnocení investice je kromě cen používaných materiálů výrobních zařízení a nákladů na mzdy obsluhy nutné znát další údaje, především předpokládanou velikost roční produkce, diskontní sazbu (požadovaná minimální výnosnost), předpokládaný vývoj inflace, růst mezd, zařazení výrobních zařízení do odpisových tříd a vývoj daně z příjmu. Pro určení ročních tržeb je rovněž nutné stanovit prodejní cenu výrobku. Poté, co stanovíme tyto údaje, je možné hodnotit výnosnost investice.

#### *Předpokládaná roční produkce*

Určení předpokládané roční produkce je poměrně obtížné a vyžaduje poměrně dobrou znalost trhu nebo provedení analýzy. Pro účely bakalářské práce jsem uvažoval předpokládanou roční produkci přibližně 200 000 kusů dle poskytnutých údajů o výrobě od podniků, které v tomto oboru podnikají.

#### *Diskontní sazba*

Diskontní sazbu lze chápat jako výnosovou míru investice, kterou jsou diskontovány budoucí peněžní toky na současnou hodnotu. Výhodou diskontní sazby je, že zahrnuje faktor času a rizika investice a vyjadřuje tak minimální požadovanou míru výnosnosti investice. Při určení diskontní sazby rovněž záleží, zda počáteční kapitálový výdaj na investici pochází z vlastního kapitálu, z cizího kapitálu nebo z kombinace vlastního a cizího kapitálu. Při financování investice z vlastního kapitálu se pro určení diskontní sazby vychází z úrokové míry bezrizikových investic (například státních dluhopisů) a rizikové přírážky. Naopak při financování investice z cizího kapitálu je diskontní sazba rovna finančním nákladům cizího kapitálu (úrokové míře). V případě kombinace vlastního a cizího kapitálu je určení diskontní sazby nejobtížnější a vychází z průměrných vážených nákladů na kapitál a je případně upraven o míru rizika investice, míru inflace atp. Pro účely této práce jsem zvolil diskontní sazbu 10 % při zvážení úrokové míry 0,5 % na termínovaných vkladech u bank a 2,5 % u družstevních záložen a míry rizika této investice.



### *Růst mezd*

Růst mezd jsem přepokládal dle vývoje průměrné mzdy v posledních pěti letech, kdy podle Českého statistického úřadu rostla v průměru o 3 % za rok. S touto hodnotu procentního nárůstu mezd jsem počítal po celou dobu trvání investice, která je 20 let.

### *Odpisy*

Odpisy můžeme rozdělit na účetní a daňové. Daňové odpisy se od účetních odpisů odlišují tím, že doba odpisování a průběh odepisování je stanoven podle zákona, zatímco účetní odpisy si společnost volí sama podle skutečnosti. Pro výpočet nákladů na jednotlivé technologie jsem použil účetní odpisy odepisované lineárně, přičemž jsem se snažil stanovit dobu životnosti odepisovaného výrobního zařízení co nejméně podle skutečnosti. Aby bylo možné stanovit hodnotu daňového základu, je potřeba správně zařadit dlouhodobý hmotný a nehmotný majetek do odpisových skupin dle přílohy č. 1 k zákonu č. 586/1992 Sb. Dlouhodobý majetek je možné odepisovat rovnoměrně či zrychleně, pro účely této práce jsem zvolil rovnoměrné odepisování.

### *Inflace*

V současné době (únor 2018) se dle České národní banky inflace pohybuje okolo 1,8 %. Vzhledem k tomu, že je inflační cíl ČNB stanoven na 2 % a inflace by se neměla od stanoveného inflačního cíle lišit o více než 1 %, tak jsem stanovil hodnotu inflace po celou dobu trvání investice na 2 %.

### *Stanovení prodejní ceny*

Prodejní cenu výrobku jsem stanovil pomocí ukazatele ekonomické efektivity investice čisté současné hodnoty (NPV) tak, aby byly splněny požadavky na diskontní sazbu a hodnotu investice na konci jejího trvání, tedy za dvacet let. Toho je docíleno právě tehdy, když je čistá současná hodnota větší nebo rovna nule. Stanovení prodejní ceny vychází z rovnice:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} = 0. \quad (8)$$

Zároveň je nutné podotknout, že takto stanovená ideální cena by měla odpovídat situaci na trhu a být konkurenceschopná.

### *Stanovení bodu zvratu*

Bod zvratu je taková velikost produkce firmy, kdy nevzniká žádný zisk ani ztráta, protože se výnosy a náklady sobě rovnají. Stanovení bodu zvratu vychází z rovnice:

$$p \cdot q = A + b \cdot q \quad (9)$$

Kde  $p$  je cena za výrobek,  $q$  je vyráběné množství,  $A$  a  $b$  jsou fixní resp. variabilní náklady.

### *Doba návratnosti investice*

Mezi základní metody posouzení efektivity investice patří doba splacení investice, ve které sledujeme, kdy akumulovaná hodnota cash flow dosáhne velikosti počátečního kapitálového výdaje. Nevýhodou ukazatele doby návratnosti investice může být to, že nebere ohled na faktor času, což lze vyřešit diskontováním finančních toků. Další nevýhodou tohoto ukazatele je, že nedává žádnou informaci, co se stane po splacení počáteční investice. Naopak mezi výhody tohoto ukazatele lze zařadit jeho jednoduchost.

## **4.2. Náklady na výrobu desek plošných spojů klasickou metodou pomocí fotolitografických procesů**

### **4.2.1. Nákladové položky při výrobě desek plošných spojů pomocí fotolitografie**

Proces výroby desek plošných spojů se skládá z mnoha dílčích úkonů, které se různě projevují na celkových nákladech na výrobu desky plošného spoje. Náklady na výrobu stanoveného jednovrstvého plošného spoje o rozměrech 12 x 19 cm bychom mohli rozdělit na variabilní a fixní náklady. Mezi variabilní náklady bychom mohli zařadit náklady na spotřebovaný materiál a energii a mezi fixní náklady bychom mohli zařadit odpisy použitých výrobních zařízení, osobní náklady na zaměstnance a případně další náklady jako nájem výrobních prostor. Jelikož motiv desky plošných spojů se dle použití mění, počítám s velikostí jedné série 500 kusů.

#### **4.2.1.1. Spotřebovaný materiál**

##### *Substrát*

Jako substrát vyráběné desky plošných spojů byl použit materiál s označením FR4, který je jednostranně plátovaný mědí. Cena za  $\text{dm}^2$  je přibližně 9,6 Kč. Ve svých výpočtech rovněž počítám s velikostí odpadu 5 %. Na jeden výrobek je tak včetně odpadu spotřebováno přibližně  $2,4 \text{ dm}^2$  substrátu v ceně 23 Kč.

##### *Fólie pro tisk filmové předlohy*

Další položkou potřebnou pro výrobu desky plošných spojů pomocí fotolitografických procesů je fólie pro tisk filmové předlohy. Dle poskytnutých údajů vychází cena jedné fólie na 60 Kč. Počet použití jedné fólie je neomezený, ale ve svých výpočtech počítám s tím, že motiv každé série je odlišný, proto je potřeba pro každou sérii, která čítá 500 kusů výrobků, vytvořit novou filmovou předlohu.

##### *Fotorezist*

Pro výrobu desek plošných spojů je využíván fotorezist. Dle získaných údajů pro roční výrobu  $260\,000 \text{ dm}^2$  činí náklady na fotorezist 500 000 Kč. Ve svých výpočtech jsem dále uvažoval, že spotřeba fotorezistu je přímo úměrná celkové ploše vyráběných výrobků.

##### *Nepájivá maska*

Mezi materiálové náklady na výrobu desky plošných spojů je rovněž potřeba započítat spotřebu nepájivé masky. Dle získaných údajů je pro výrobu  $260\,000 \text{ dm}^2$  potřeba 260 kg nepájivé masky. Cena za 1 kg nepájivé masky je přibližně 1 500 Kč. Ve svých výpočtech jsem opět úlohu zjednodušil tím, že jsem uvažoval, že spotřeba nepájivé masky je přímo úměrná velikosti produkce resp. celkové ploše vyráběných produktů.

### *Povrchová ochrana*

Další materiálovou položkou je povrchová ochrana, která slouží k ochraně kontaktních plošek před vznikem oxidační vrstvy. Pro kalkulaci jsem uvažoval s povrchovou ochranou tvořenou organickými inhibitory tzv. OSP a to z toho důvodu, že OSP nabízí velmi dobrý poměr mezi kvalitou ochrany a cenou. Z poskytnutých údajů vyplývá, že roční spotřeba pro výrobu 260 000 dm<sup>2</sup> je 160 kg, přičemž cena za 1 kg se pohybuje okolo 625 Kč. Opět jsem pro zjednodušení výpočtů počítal s přímou úměrností mezi velikostí produkce a spotřebou OSP.

### *Chemikálie pro vyvolání motivu, stripování fotorezistu a k oplachu desek*

Další potřebnou položkou pro výrobu desky plošných spojů pomocí fotolitografických procesů jsou chemikálie, které se používají pro odleptání nežádoucí mědi a k stripování, tedy k odstranění fotorezistu. Pro zjednodušení jsem počítal s tím, že cena těchto chemikálií je totožná. Pro vyvolání motivu se používá roztok chloridu železitého a k odstranění fotorezistu se používá například dimethylsulfoxid. Dle získaných údajů je pro výrobu 260 000 dm<sup>2</sup> spotřebováno přibližně 9 000 litrů těchto chemikálií. Při ceně přibližně 44 Kč za 1 litr vychází celkové roční náklady na pořízení chemikálií na 400 000 Kč. Jelikož tyto látky jsou poměrně nebezpečné, v souvislosti s jejich používáním vznikají další náklady na likvidaci těchto nebezpečných látek. Cena za likvidaci 1 litru vychází přibližně na 4 Kč. Pro zjednodušení jsem počítal, že je spotřeba těchto chemikálií přímo úměrná s velikostí produkce a že je nutné zlikvidovat veškeré použité chemikálie. Pro oplach desek plošných spojů se používá voda, vzhledem k její nízké ceně jsem tuto položku ve výpočtech zanedbal.

#### **4.2.1.2. Použitá zařízení**

Dalším nákladem na výrobu desek plošných spojů jsou účetní odpisy použitého výrobního zařízení. Výroba desek plošných spojů se vyznačuje nutností nákupu poměrně velkého množství výrobního zařízení za vysokou pořizovací cenu. Celková pořizovací cena výrobního zařízení je 22 407 000 Kč.

### *Photoplotter*

Prvním zařízením nutným pro výrobu desek plošných spojů je photoplotter, který vytváří filmovou předlohu. Pořizovací cena průmyslového photplotteru je přibližně 3 mil. Kč. Při výpočtech jsem uvažoval s životností tohoto přístroje na 20 let. Roční účetní odpisy tohoto zařízení činí 150 000 Kč.

### *Osvitové zařízení*

Dalším zařízením, které je nutné pro výrobu desek plošných spojů je osvitové zařízení, které se používá k selektivnímu osvit fotorezistu přes filmovou šablonu UV zářením. Cena osvitového zařízení se pohybuje okolo 1,5 mil. Kč. Při výpočtech uvažuji životnost tohoto zařízení na 20 let. Roční účetní odpisy tak vychází na 75 000 Kč.

### *Linka pro vyvolání motivu*

Dále se pro výrobu desek plošných spojů využívá zařízení na vyvolání motivu, ve kterém je smyt nevytvrzený rezist. Pořizovací cena linky pro vyvolání motivu je přibližně 920 tis. Kč. Ve výpočtech počítám se životností tohoto zařízení 20 let. Roční účetní odpisy jsou 46 000 Kč.

### *Leptací zařízení*

Pro odstranění mědi, která není chráněna fotorezistem, se používá leptací zařízení, jehož pořizovací cena je 2 781 000 Kč. Při uvažované životnosti 20 let vychází roční účetní odpisy na 139 050 Kč.

### *Tester AOI*

Pro kontrolu správnosti vytvořeného motivu se používá AOI tester. Cena průmyslových AOI testerů je dle získaných údajů 4 349 000 Kč. Při výpočtech uvažuji s dobou životnosti tohoto zařízení na 20 let. Účetní odpisy na jeden rok pak činí 217 450 Kč.

### *Přímé nanášení nepájivé masky*

Zařízení na nanášení nepájivé masky, která slouží jako ochrana motivu před pájkou při pájení součástek a jako ochrana před vnějšími vlivy. Cena zařízení na nanášení nepájivé masky je přibližně 5 000 000 Kč a životnost zařízení je 20 let. Roční účetní odpisy jsou 250 000 Kč.

### *Linka na nanášení OSP vč. ultrazvukového modulu*

Cena zařízení pro nanášení ochranné vrstvy na kontaktní plošky vč. ultrazvukového modulu na odstranění nečistot před nanášením je 1 465 000 Kč. Účetní odpisy při uvažování doby životnosti zařízení 20 let vychází přibližně na 73 250 Kč.

### *Vrtačka*

Poslední zařízení, které je nezbytné výrobu jednovrstvých desek plošných spojů, je průmyslová vrtačka, která vytváří zakládací otvory a otvory pro montáž součástek. Cena průmyslové vrtačky je přibližně 3 mil. Kč a při uvažování životnosti na 20 let jsou roční účetní odpisy 150 000 Kč.

### *Příprava výrobních dat*

Pro výrobu je nutné nejprve připravit výrobní data z podkladů od zákazníků. Pro tyto účely se používá specializovaný software CAM 350 na principu CAD. Licence tohoto softwaru je neomezená, proto předpokládám dobu životnosti 20 let. Cena tohoto softwaru je 362 000 Kč, při uvažování délky životnosti 20 let, činí roční účetní odpisy 18 100 Kč.

Dále je pro přípravu výrobních dat potřeba počítač, ve svých výpočtech předpokládám s pravidelným obnovováním počítače každých pět let. Účetní odpisy počítače vychází na 6 000 Kč.

#### **4.2.1.3. Osobní náklady**

Pro obsluhu této linky na výrobu jednovrstvých desek plošných spojů je potřeba deseti osob na plný úvazek, z toho osm osob pro obsluhu zařízení, jejichž hrubá měsíční mzda činí 18 000 Kč, jednoho na funkci seřizovače s hrubou měsíční mzdou 25 000 Kč a mistra výroby, jehož mzda je 30 000 Kč. Celkové roční osobní náklady včetně povinných odvodů na sociální a zdravotní pojištění tak činí přibližně 3 200 000 Kč.

#### **4.2.1.4. Ostatní náklady**

Také jsem do svých výpočtů zahrnul náklady na elektrickou energii spotřebovanou výrobním zařízením. Dle poskytnutých údajů jsou celkové roční náklady na elektrickou energii spotřebovanou výrobním zařízením pro výrobu 260 000 dm<sup>2</sup> přibližně 450 000 Kč. Pro zjednodušení výpočtů jsem uvažoval, že je spotřeba elektrické energie přímo úměrná velikosti produkce.

Mezi ostatní náklady lze rovněž uvažovat údržbu a servis výrobního zařízení, dle poskytnutých údajů vychází roční údržba na 600 000 Kč.

Dále jsem v kalkulaci nákladů uvažoval další náklady, jako jsou režijní náklady, nájemné, náklady na osvětlení, teplo atd. ve velikosti 1 500 000 Kč.

#### 4.2.2. Kalkulace nákladů na jeden vyrobený kus

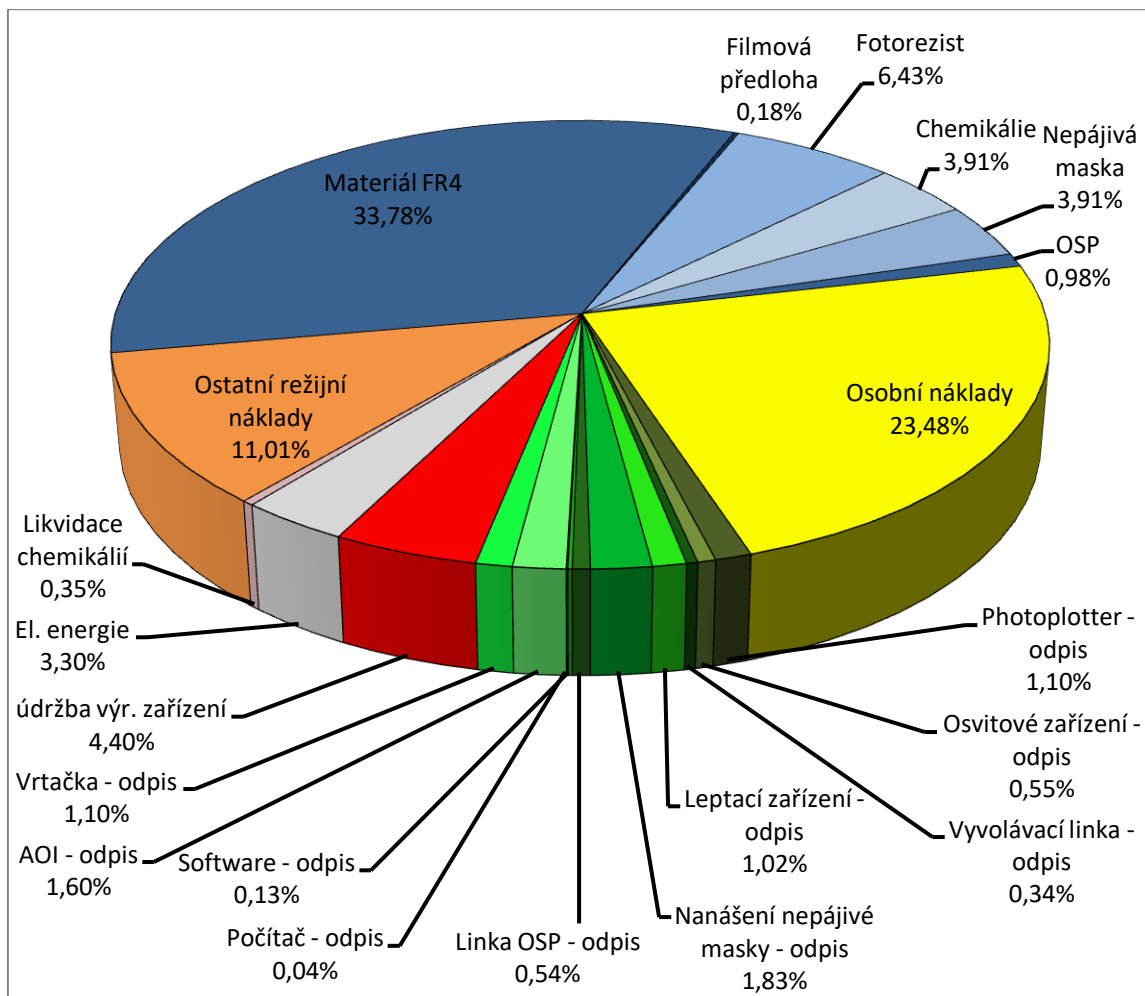
Dle údajů z bodu 4.2.1. jsem stanovil celkové náklady na výrobu jedné desky plošných spojů pomocí fotolitografických procesů. Pro vyčíslení nákladů na jeden vyrobený kus jsem počítal s roční produkcí 200 000 kusů.

Položka	Podíl	Cena v Kč
<b>Spotřebovaný materiál celkem</b>	<b>49,20%</b>	<b>33,52</b>
Materiál FR4	33,78%	23,02
Filmová předloha	0,18%	0,12
Fotorezist	6,43%	4,38
Chemikálie	3,91%	2,67
Nepájivá maska	3,91%	2,67
OSP	0,98%	0,67
<b>Osobní náklady celkem</b>	<b>23,48%</b>	<b>16,00</b>
Osobní náklady	23,48%	16,00
<b>Odpisy celkem</b>	<b>8,25%</b>	<b>5,62</b>
Photoplotter - odpis	1,10%	0,75
Osvětové zařízení - odpis	0,55%	0,38
Vyvolávací linka - odpis	0,34%	0,23
Leptací zařízení - odpis	1,02%	0,70
Nanášení nepájivé masky - odpis	1,83%	1,25
Linka OSP - odpis	0,54%	0,37
Software - odpis	0,13%	0,09
Počítač - odpis	0,04%	0,03
AOI - odpis	1,60%	1,09
Vrtačka - odpis	1,10%	0,75
<b>Celkem údržba výrobního zařízení</b>	<b>4,40%</b>	<b>3,00</b>
údržba výrobního zařízení	4,40%	3,00
<b>Spotřeba el. energie</b>	<b>3,30%</b>	<b>2,25</b>
Elektrická energie	3,30%	2,25
<b>Likvidace chemikálií</b>	<b>0,35%</b>	<b>0,24</b>
Likvidace chemikálií	0,35%	0,24
<b>Ostatní režijní náklady (nájem,...)</b>	<b>11,01%</b>	<b>7,50</b>
<b>Celkové náklady na 1 kus</b>	<b>100,00%</b>	<b>68,14</b>

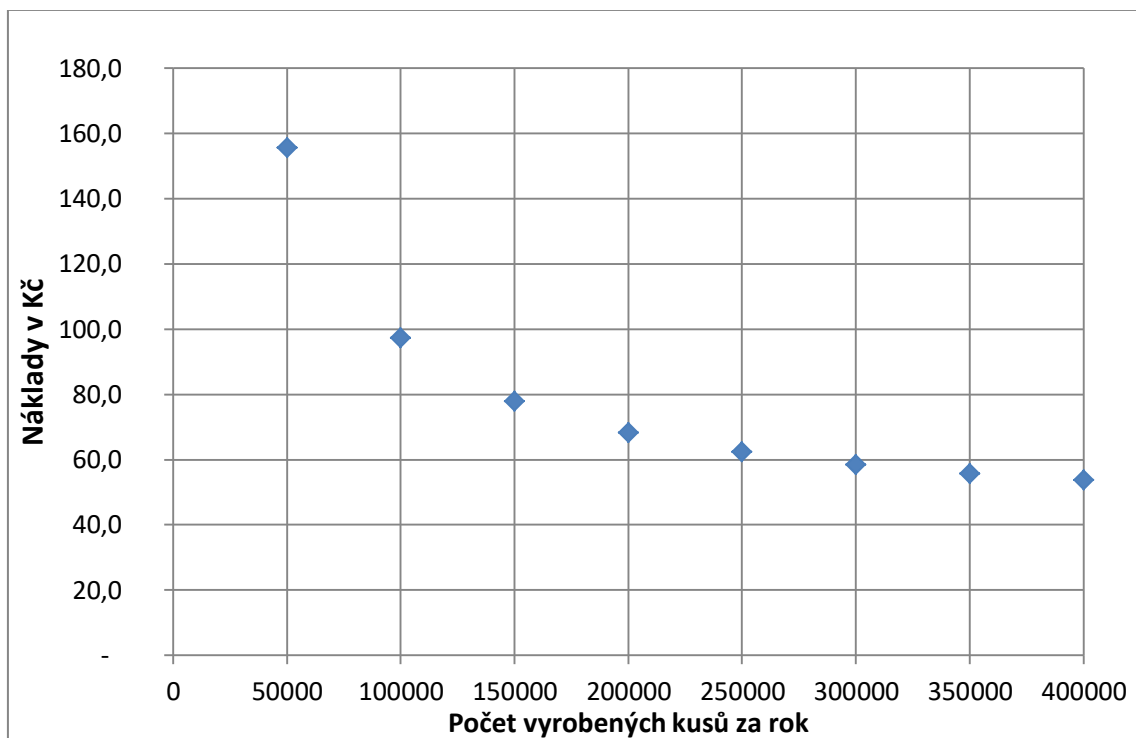
Tab. 11: Kalkulace nákladů na 1 vyrobený kus pomocí fotolitografických procesů pro roční produkci 200 000 ks

Z tabulky č. 11 vyplývá, že výrobní náklady na 1 vyrobený kus dosahují při roční produkci 200 000 kusů 68,14 Kč. Největší podíl na výrobních nákladech má základní materiál – substrát a osobní náklady na zaměstnance. Tyto náklady dohromady tvoří téměř 60 % z výrobních nákladů.

Tabulka, ve které je možné pozorovat změnu nákladů na jeden vyrobený kus v závislosti na velikosti roční produkce, je uvedena v příloze č. 5.



Graf 17: Struktura nákladů na 1 vyrobený kus pomocí fotolitografických procesů při roční produkci 200 000 kusů



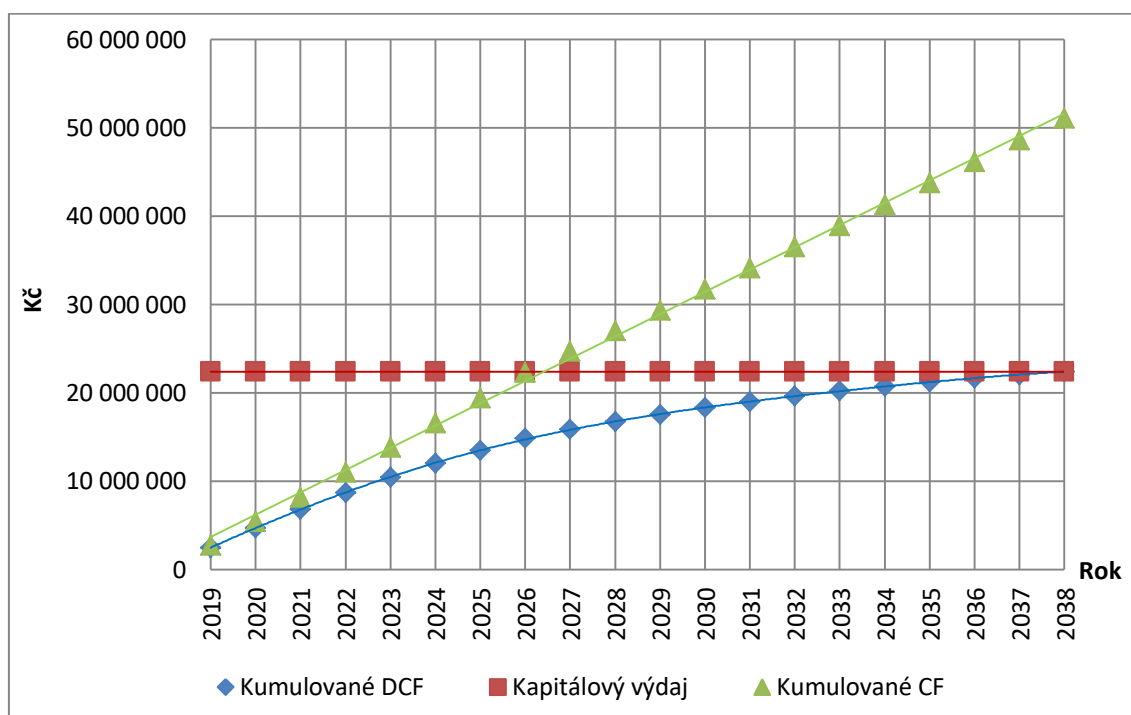
Graf 18: Náklady v Kč na 1 vyrobený kus pomocí fotolitografických procesů v závislosti na velikosti produkce

### 4.2.3. Posouzení efektivnosti investice

Tato kapitola je věnována posouzení ekonomické efektivnosti investice do výroby jednovrstvých desek plošných spojů pomocí fotolitografických procesů a to z pohledu doby návratnosti investice a bodu zvratu. Tabulka, která byla použita pro výpočet peněžních toků pro jednotlivé roky trvání investice, je přiložena v příloze č. 5.

#### 4.2.3.1. Doba návratnosti investice

Z grafu č. 19 je patrné, že prostá doba návratnosti, která neuvažuje časovou hodnotu peněz, je přibližně 8,5 roku, zatímco diskontovaná doba návratnosti je přesně 20 let. Diskontovaná doba návratnosti investice je tedy rovna době, po kterou je investice hodnocena, což je způsobeno stanovením prodejní ceny výrobku tak, aby čistá současná hodnota byla nulová. Přesnou dobu návratnosti jsem určil výpočtem na 8,23 roku za předpokladu rovnoměrných tržeb v průběhu 9. roku.

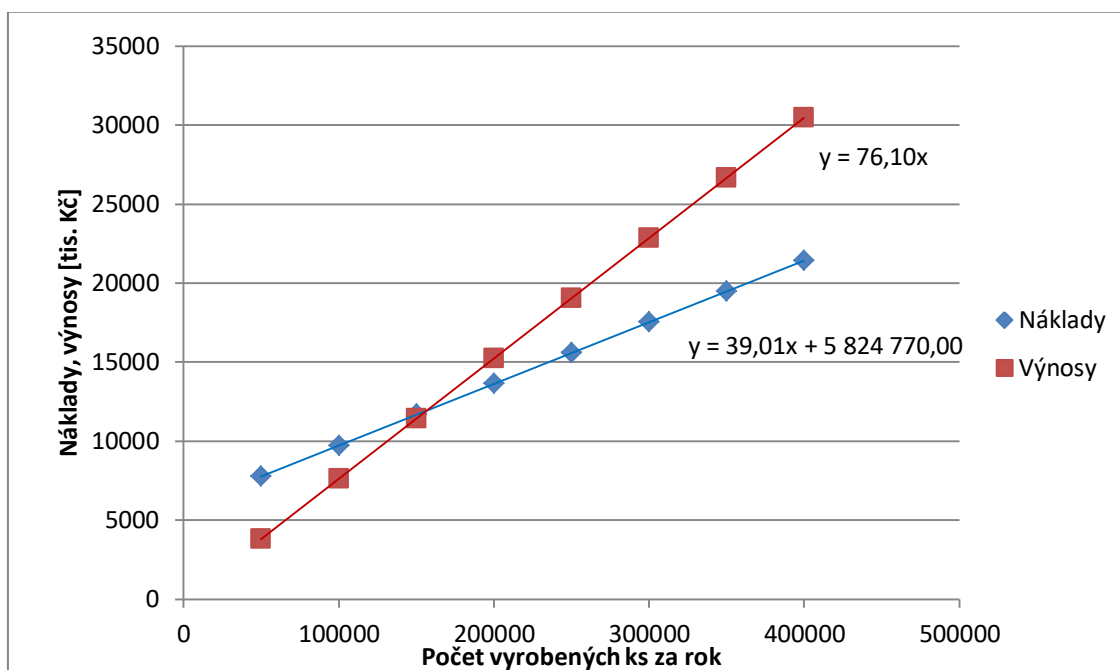


Graf 19: Výroba DPS pomocí fotolitografických procesů - prostá a diskontovaná doba návratnosti investice



#### 4.2.3.2. Bod zvratu

Při určení bodu zvratu jako průsečíku výnosové a nákladové křivky, vychází bod zvratu na 157 061 vyrobených kusů. Při využití numerického nástroje programu Microsoft Excel „hledání řešení“, byl nalezen bod zvratu v 156 972 vyrobených kusech. Tento rozdíl je možné zdůvodnit méně přesným zadáním obecné rovnice těchto přímk. Nicméně bod zvratu je menší než plánovaný počet vyráběných kusů, proto lze při výrobě 200 000 kusů dosáhnout zisku. Dále je z obecné rovnice nákladové křivky v grafu č. 20 patrné, že celkové fixní náklady se rovnají 5 824 770 Kč a že celkové variabilní náklady na jeden vyráběný kus jsou přibližně rovny 39 Kč.



Graf 20: Bod zvratu pro výrobu desek plošných spojů pomocí fotolitografie

### **4.3. Náklady na výrobu desek plošných spojů pomocí technologie tlustých vrstev**

#### **4.3.1. Nákladové položky při výrobě desek plošných spojů pomocí tlustých vrstev**

V této kapitole budou stanoveny výrobní náklady na výrobu desky plošných spojů pomocí technologie tlustých vrstev. Díky většímu rozlišení tlustovrstvé technologie, které je možné dosáhnout díky vybudování čistých prostor, může být výsledná deska plošných spojů rozměrově menší, než deska plošných spojů vyráběná fotolitograficky se stejným motivem. Rozměry vyráběné desky plošných spojů jsou 10 x 15 cm. Pro nanášení tlusté vrstvy jsem zvolil síťotisk. Základní princip síťotisku je popsán v kapitole č. 2.4.1. Po nanesení vodivé vrstvy je vrstva vypálena v tunelové peci. Po vypálení vodivé vrstvy je natištěna ochranná vrstva, která je po natištění rovněž vypálena v tunelové peci.

##### **4.3.1.1. Spotřebovaný materiál**

###### *Substrát*

Jako substrát na výrobu desky plošných spojů byl v tomto případě z důvodu vysoké teploty výpalu vodivé vrstvy a ochranné vrstvy použit korundový substrát 96 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Cena substrátu o rozměrech 10 x 15 cm je dle zjištěných údajů 20 Kč.

###### *Vodivá pasta*

Pro tvorbu motivu byla použita anorganická AgPd pasta s poměrem 3 díly Ag a 1 díl Pd. Množství pasty nanášené na substrát pro výrobu jednoho výrobku je přibližně 1 g. Cena pasty je poměrně výrazně závislá na ceně palladia vzhledem k jeho vysoké ceně. Další komplikací je omezené množství zdrojů, které jsou navíc většinou situovány v Ruské federaci. Cena takové pasty se dle aktuální ceny palladia a stříbra pohybuje v rozmezí 50 – 200 Kč/g. Ve svých výpočtech počítám s cenou 90 Kč/g.

###### *Ochranná vrstva*

Na ochranu motivu před vnějšími vlivy se používá ochranná vrstva, která je tvořena jemným práškem ze skel či oxidu hliníku. Cena této pasty je 10 Kč/g. Při výpočtu opět uvažuji, že na jeden výrobek je natištěn 1 g této ochranné vrstvy.

###### *Síťo*

Motiv je realizován pomocí síťy z nerezových vláken, jehož cena síťy je přibližně 2 000 Kč. Životnost síťy se dle tlaku na těrku pohybuje v rozmezí 1 000 – 2 000 tisků, což je více, než předpokládaná velikost jedné série. Motiv lze ze síťy odstranit a vytvořit nový. Toto lze provést jedenkrát, poté je nutné síťovinu vyměnit. Náklady na síťo při započtení výroby motivu na síťo tak na jednu sérii vycházejí přibližně na 1 200 Kč včetně nákladů na odstranění starého motivu ze síťy.

###### *Chemikálie pro čištění síťy*

Před odstraněním starého motivu ze síťy je potřeba síťo očistit od zbytků pasty, aby nedošlo k ucpání ok síťy, na čištění se používá aceton či jiné ředidlo, cena acetonu za 1 litr je 90 Kč.

#### **4.3.1.2. Použitá zařízení**

Podobně jako u výroby desek plošných pomocí fotolitografie, je nutné do kalkulace nákladů zahrnout účetní odpisy použitého výrobního zařízení. Celková investice do zařízení na počátku výroby je 23 889 000 Kč.

##### *Sítotiskové stroje*

Pro realizaci vodivých motivů byly kalkulovány tři poloautomatické sítotiskové stroje bez optického vyrovnání a jeden poloautomatický sítotiskový stroj s optickým vyrovnáním.

Poloautomatický sítotiskový stroj s optickým vyrovnáním umožňuje přesný sůtisk vrstev motivu a hodí se pro tisk motivů, kde je nutná velká přesnost, například pro tisky hybridních obvodů. Výrobní kapacita je přibližně 100 tisků za hodinu. Příkon tohoto sítotiskového stroje je 1 200 W. Pořizovací cena tohoto sítotiskového stroje činí přibližně 3 mil. Kč.

Poloautomatický sítotiskový stroj s mechanickým vyrovnáním má vyšší výrobní kapacitu, avšak poskytuje nižší přesnost zarovnání motivu. Výrobní kapacita je přibližně 120 tisků za hodinu. Příkon tohoto zařízení je přibližně 1 000 W. Pořizovací cena je vzhledem k absenci optického zarovnání nižší a pohybuje se okolo 500 000 Kč.

Doba životnosti obou typů sítotiskových strojů je při správné údržbě přibližně 20 let. Celkové roční účetní odpisy za sítotiskové stroje činí 225 000 Kč. Náklady na servis každého ze zařízení dosahují 10 000 ročně.

##### *Tunelová pec*

Po tisku každé vrstvy je nutné tuto vrstvu vypálit, to se realizuje v tunelové peci. Pořizovací cena tunelové pece je 5 mil. Kč. Maximální kapacita tunelové pece je 350 substrátů za hodinu. Příkon tunelové pece, která používá odporový ohřev, je 40 kW. Doba životnosti tunelové pece je 20 let, náklady na každoroční údržbu jsou 20 000 Kč. Roční účetní odpisy činí 250 000 Kč.

##### *Tester AOI*

Pro kontrolu kvality natištěného motivu jsem v kalkulaci nákladů použil AOI tester, jehož pořizovací cena činí 4 349 000 Kč a dobu životnosti odhaduji na 20 let. Roční účetní odpisy pak vycházejí na 217 450 Kč.

##### *Příprava výrobních dat*

Pro přípravu výrobních dat jsem vzhledem k nižší náročnosti na výrobní data v kalkulaci uvažoval využití programu AutoCAD LT, s cenou licence na 1 rok přibližně 10 000 Kč. Dále je pro přípravu výrobních dat potřeba počítač v pořizovací ceně 30 tis. Kč a s dobou životnosti 5 let. Roční účetní odpisy počítače jsou 6 000 Kč.

#### **4.3.1.3. Osobní náklady**

Mzdové náklady pro obsluhu výrobní linky na výrobu desek plošných spojů pomocí tlustovrstvé technologie jsou shodné se mzdovými náklady výrobní linky DPS pomocí fotolitografických procesů. Roční mzdové náklady tedy činí přibližně 3 200 000 Kč.

#### 4.3.1.4. Ostatní náklady

Mezi ostatní náklady lze zařadit čisté prostory, které jsou nutné pro tisk motivů s malým rozlišením. Náklady na vybudování čistých prostor se pohybují okolo 10 mil. Kč. V kalkulaci nákladů počítám s dobou životnosti těchto čistých prostor 20 let. Náklady na udržení čistých prostor jsou přibližně 50 000 Kč a roční účetní odpisy čistých prostor jsou 500 000 Kč

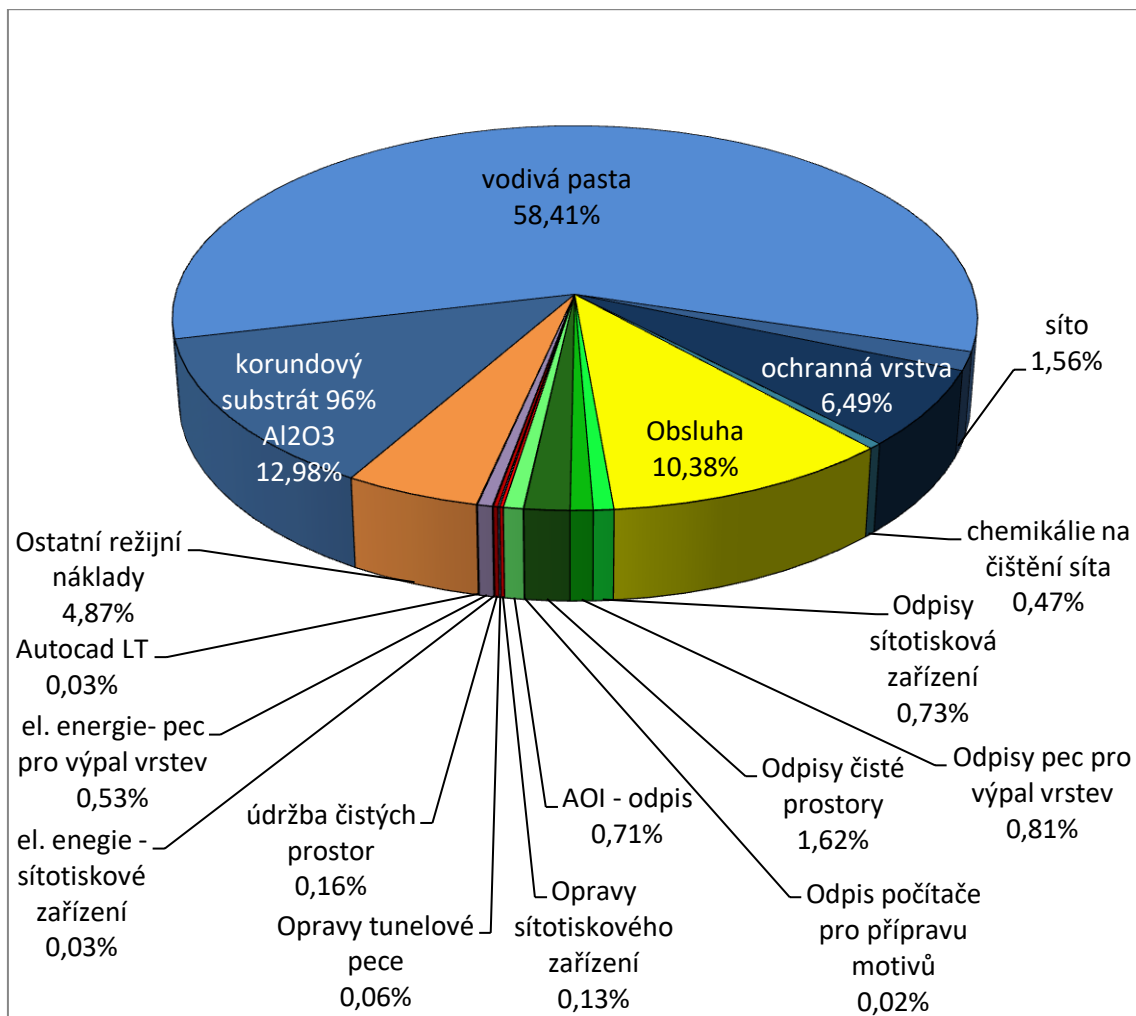
Mezi ostatní náklady jsem rovněž zařadil režijní náklady, nájemné apod., pro výpočet jsem opět odhadl velikost těchto nákladů na 1,5 mil. Kč na rok.

#### 4.3.2. Kalkulace nákladů na jeden vyrobený kus

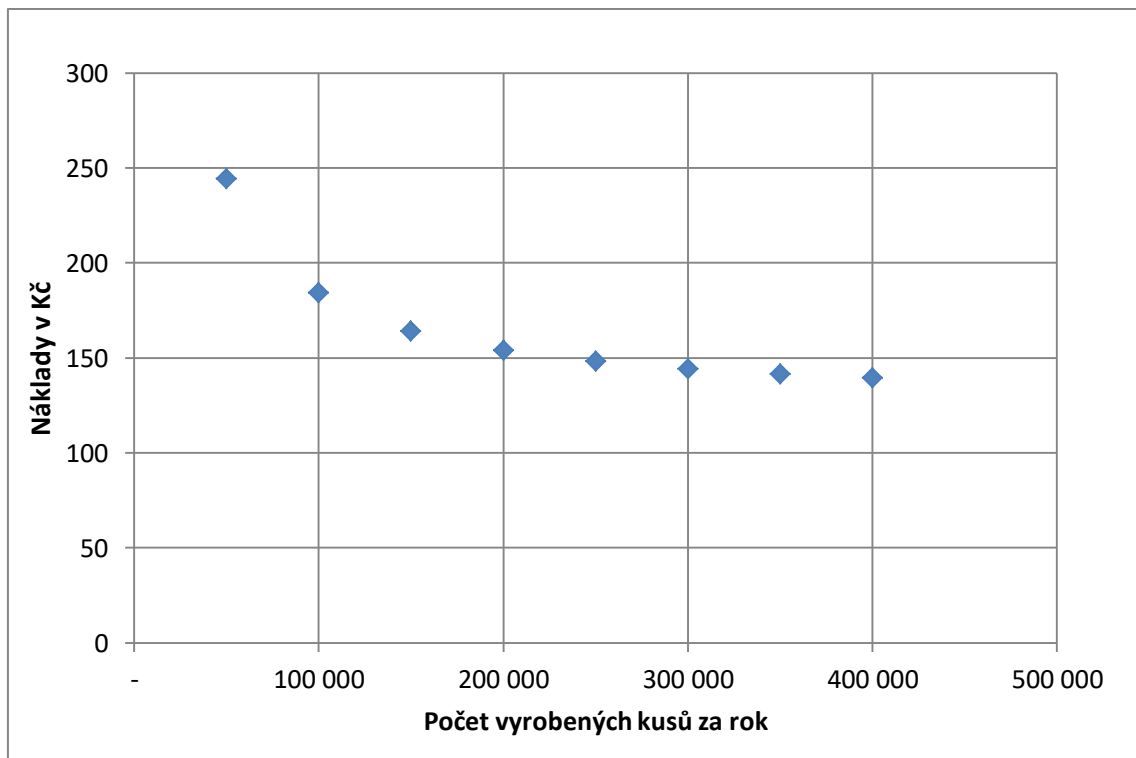
Pro vyčíslení nákladů na jeden vyrobený kus jsem počítal s roční produkcí 200 000 kusů. Z tabulky č. 12 vyplývá, že téměř 80 % nákladů tvoří spotřebovaný materiál, přičemž velkou část nákladů na spotřebovaný materiál tvoří vodivá pasta.

Položka	Podíl	Cena v Kč
<b>Spotřebovaný materiál celkem:</b>	<b>79,90%</b>	<b>123,12</b>
korundový substrát 96% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,98%	20,00
vodivá pasta	58,41%	90,00
síto	1,56%	2,40
ochranná vrstva	6,49%	10,00
chemikálie na čištění síta	0,47%	0,72
<b>Osobní náklady celkem:</b>	<b>10,38%</b>	<b>16,00</b>
Osobní náklady	10,38%	16,00
<b>Odpisy celkem:</b>	<b>3,89%</b>	<b>5,99</b>
Zařízení na sítotisk	0,73%	1,13
Pec pro výpal vrstev	0,81%	1,25
Vybudování čistých prostor	1,62%	2,50
počítač pro přípravu motivů	0,02%	0,03
AOI	0,71%	1,09
<b>Celkem údržba výrobního zařízení:</b>	<b>0,36%</b>	<b>0,55</b>
Opravy sítotiskového zařízení	0,13%	0,20
Opravy tunelové pece	0,06%	0,10
údržba čistých prostor	0,16%	0,25
<b>Spotřebovaná el. energie:</b>	<b>0,57%</b>	<b>0,88</b>
Sítotiskové zařízení	0,03%	0,05
Pec pro výpal vrstev	0,53%	0,82
<b>Software:</b>	<b>0,03%</b>	<b>0,05</b>
AutoCAD LT	0,03%	0,05
<b>Ostatní režijní náklady (nájem,...)</b>	<b>4,87%</b>	<b>7,50</b>
<b>Celkové náklady na 1 kus</b>	<b>100,00%</b>	<b>154,09</b>

Tab. 12: Kalkulace nákladů na 1 vyrobený kus pomocí technologie tlustých vrstev pro roční produkci 200 000 ks



Graf 19: Struktura výrobních nákladů na výrobu 1 ks při roční produkci 200 000 ks



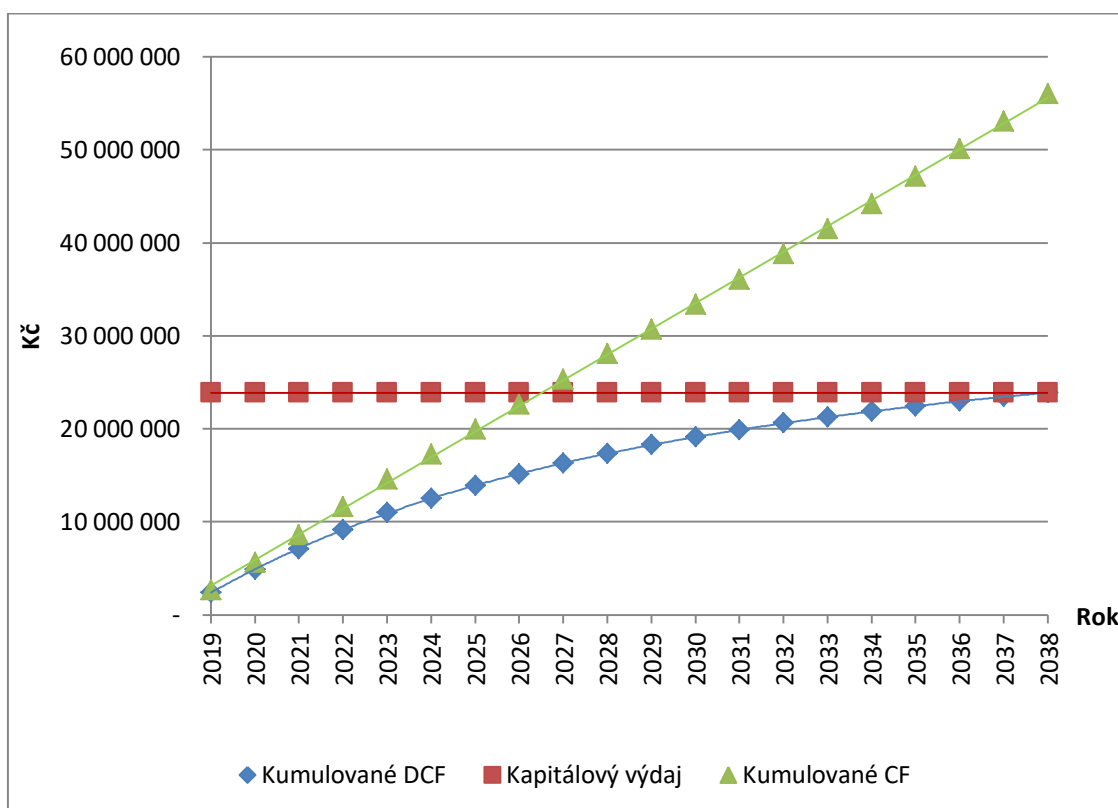
Graf 20: Náklady v Kč na 1 vyrobený kus pomocí technologie tlustých vrstev v závislosti na velikosti produkce

### 4.3.3. Posouzení efektivity investice

Tato kapitola je obdobně jako u výroby desek plošných spojů věnována posouzení efektivity investice do výroby desek plošných spojů pomocí tlustých vrstev. Efektivnost investice je posuzována z pohledu doby návratnosti a bodu zvratu. Výpočetní tabulka pro výpočet peněžních toků v jednotlivých letech trvání investice je součástí přílohy č. 5.

#### 4.3.3.1. Doba návratnosti investice

V grafu č. 21 vidíme, že nediskontovaná doba návratnosti investice je 8,5 roku a diskontovaná doba návratnosti je stejně jako u výroby DPS pomocí fotolitografických procesů 20 let, jelikož prodejní cena výrobku byla stanovena stejným způsobem pomocí nulové hodnoty čisté současné hodnoty. Přesnou prostou nediskontovanou dobu návratnosti jsem za předpokladu rovnoměrných tržeb v 9. roce určil na 8,47 roku.

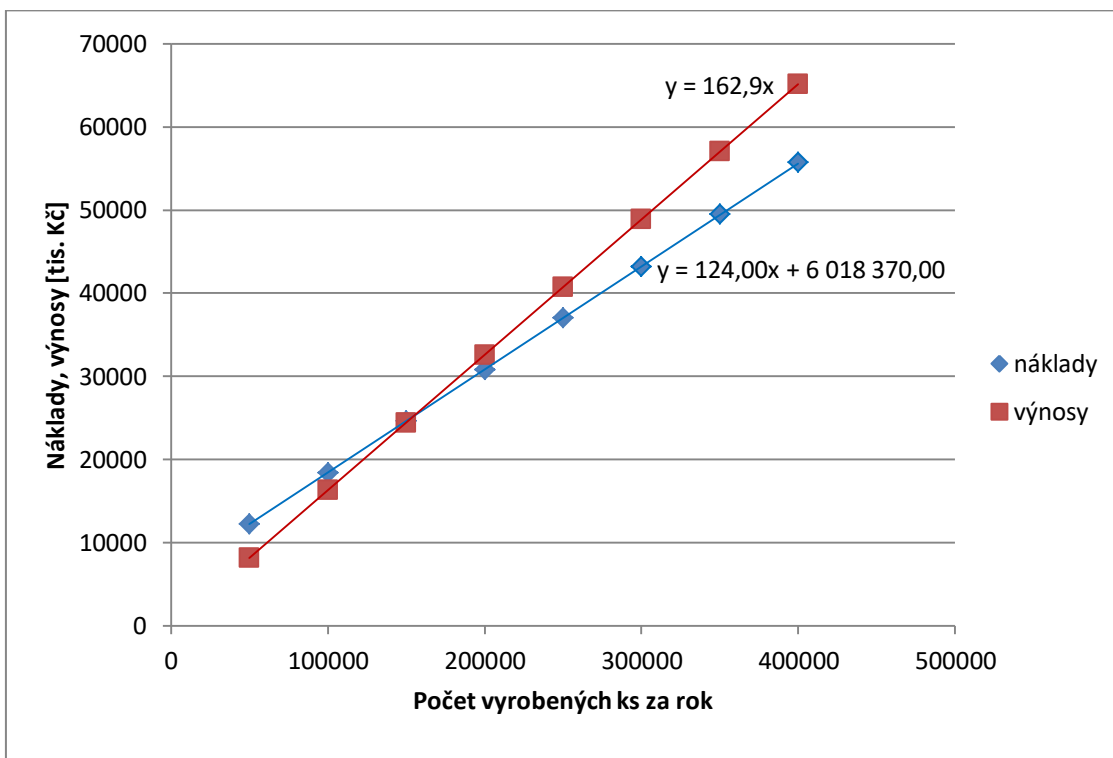


Graf 21: Výroba DPS pomocí tlustovrstvých technologií - prostá a diskontovaná doba návratnosti investice

#### 4.3.3.2. Bod zvratu

Při využití nástroje hledání řešení byl nalezen bod zvratu 152 064 vyrobených kusů za rok. Při výpočtu bodu zvratu jako průsečíku výnosové a nákladové křivky byl bod zvratu určen při velikosti roční produkce 154 714 kusů. Toto lze opět přiřadit nepřesnému vyjádření rovnic křivek, proto považuji i v tomto případě numerické řešení nalezené pomocí řešitele za přesnější. V obou případech řešení je ovšem bod zvratu nižší než plánovaná velikost roční produkce.

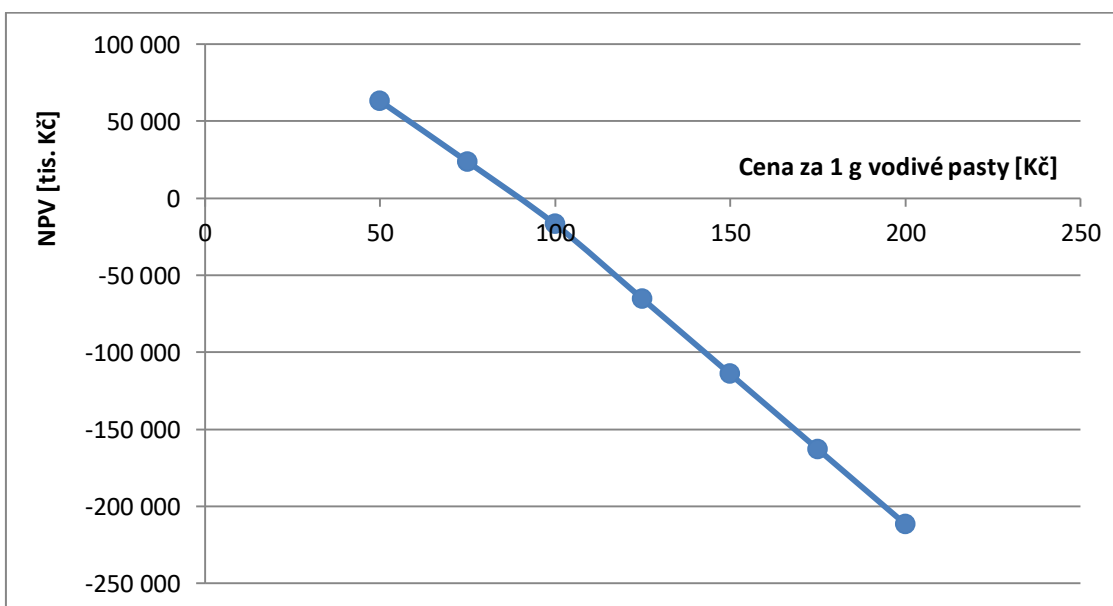
V grafu č. 22 lze rovněž vidět funkční předpis nákladové funkce. Z tohoto funkčního předpisu je patrné, že fixní náklady na výrobu desek plošných spojů pomocí tlustých vrstev jsou rovny 6 018 370 Kč a variabilní náklady činí 124 Kč.



Graf 22: Bod zvratu pro výrobu desek plošných spojů pomocí tlustých vrstev

#### 4.3.3.3. Závislost čisté současné hodnoty na ceně vodivé pasty

Jak již bylo zmíněno výše, cena vodivé pasty je závislá na ceně stříbra a palladia. Cena pasty se pohybuje v rozmezí 50 – 200 Kč/g. Z tohoto důvodu jsem prověřil závislost čisté současné hodnoty investice na ceně pasty. Z grafu č. 23 vyplývá, že čistá současná hodnota investice je silně závislá na ceně pasty a to z toho důvodu, že pasta představuje podstatnou část nákladů na výsledný výrobek. V případě, že by se cena pasty pohybovala nad 90 Kč/g, NPV investice by byla záporné, proto by se muselo přistoupit na úpravu prodejní ceny výrobku, jinak by nebylo dosaženo požadovaného zhodnocení investice, nebo by dokonce byla investice ztrátová.



Graf 22: Závislost čisté současné hodnoty na ceně vodivé pasty

## **4.4. Porovnání technologií z pohledu ekonomického**

### *4.4.1. Investice*

Velikost investice do technologie výroby desek plošných spojů pomocí fotolitografických procesů je 22 407 000 Kč, do technologie tlustých vrstev je 23 889 000 Kč. Hodnota investice do technologie tlustých vrstev je tedy vyšší. Vyšší nároky na velikost investice jsou způsobeny náklady na vybudování čistých prostor, které činí 10 mil. Kč. Bez investice do čistých prostor by velikost investice do výroby desek plošných spojů pomocí tlustých vrstev byla podstatně nižší než v případě fotolitografických procesů, avšak realizace motivů s vyšším rozlišením by bylo pravděpodobně spojeno s vyššími náklady na výrobky, jejichž vodivé motivy by byly znehodnoceny vlivem nečistot.

### *4.4.2. Náklady*

Roční fixní náklady na výrobu DPS pomocí fotolitografie jsou 5 824 770 Kč, v případě výroby DPS pomocí technologie tlustých vrstev roční fixní náklady činí 6 018 370 Kč. Fixní náklady jsou vyšší v případě technologie tlustých vrstev z důvodu vyšších účetních odpisů vzhledem k vyšší počáteční investici do vybavení.

Variabilní náklady na výrobu DPS pomocí fotolitografických procesů jsou 39 Kč/kus, a v případě technologie tlustých vrstev jsou vyšší – 124 Kč/kus. Variabilní náklady na výrobu DPS pomocí fotolitografických procesů jsou nižší především díky tomu, že materiál potřebný pro výrobu DPS je citelně levnější.

### *4.4.3. Doba návratnosti investice*

Nediskontovaná doba návratnosti investice do technologie výroby DPS pomocí fotolitografických procesů je 8,23 roku, zatímco do technologie tlustých vrstev je doba splacení investice 8,47 roku. Doba návratnosti investice je tedy v případě fotolitografických procesů kratší, to je způsobeno nižší investicí na počátku.

Diskontovaná doba návratnosti je u obou investic 20 let vzhledem k způsobu určení prodejní ceny výrobků pomocí nulové hodnoty čisté současné hodnoty investice.

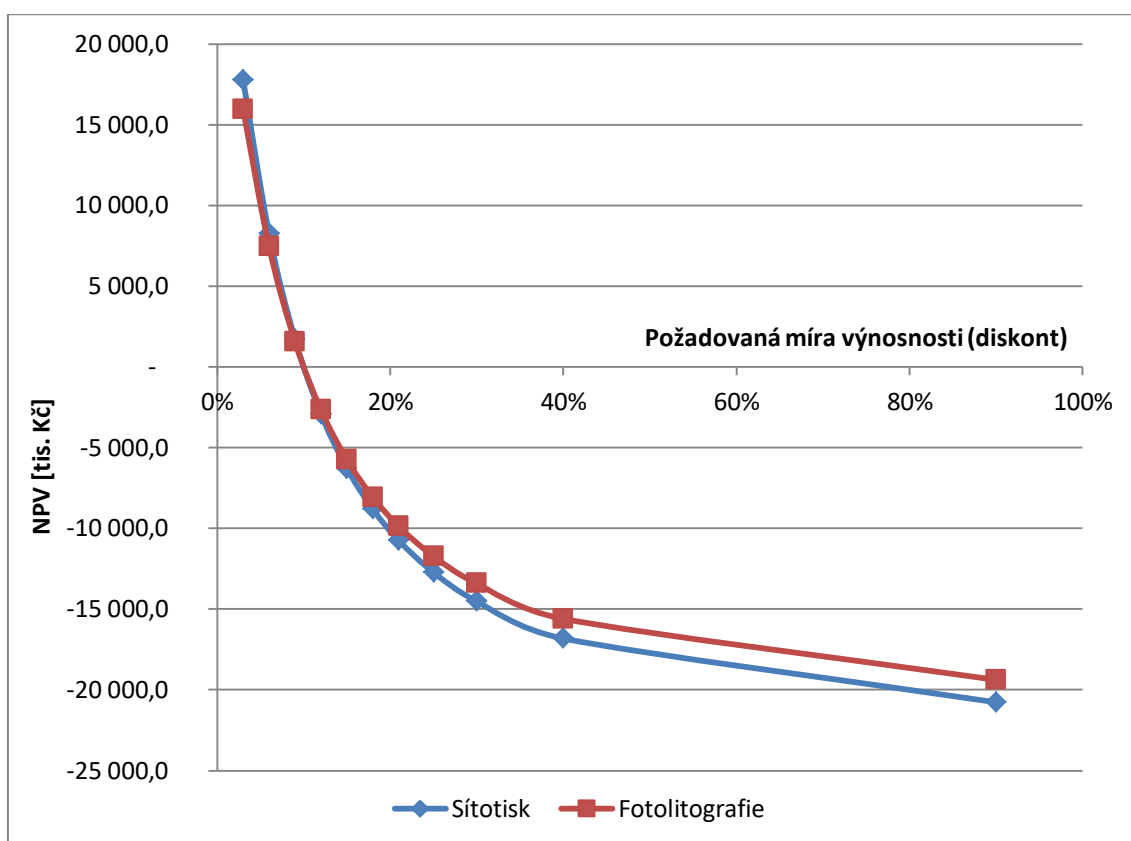
### *4.4.4. Bod zvratu*

Bod zvratu určený pomocí nástroje programu Microsoft Excel „hledání řešení“ je v případě fotolitografických procesů 157 061 vyrobených kusů, zatímco v případě technologie tlustých vrstev je bod zvratu 152 064 vyrobených kusů. Bod zvratu je u technologie tlustých vrstev nižší, pro dosažení zisku je potřeba nižšího počtu vyrobených kusů, což je způsobeno vyšším ziskem na jednom vyrobeném kuse.



#### 4.4.5. Závislost NPV na velikosti požadované míry výnosnosti

Vzhledem k tomu, že cena výsledných výrobků u obou technologií byla určena tak, aby čistá současná hodnota (NPV) při požadované míře výnosnosti 10 % byla nulová, investice se tak z hodnoty NPV při požadovaném diskontu 10 % jeví jako totožné. Rovněž vnitřní výnosové procento obou investic je shodné (10 %). Z těchto důvodů jsem vynesl závislost NPV obou investic na velikosti požadovaného diskontu do grafu. Z grafu č. 23 je patrné, že velikost NPV investice do technologie tlustých vrstev je nepatrně vyšší v intervalu požadované míry výnosnosti do 10 %, investice do technologie tlustých vrstev je tedy na tomto intervalu výhodnější. Naopak pro diskont vyšší než 10 % je velikost NPV vyšší u investice do technologie výroby DPS pomocí fotolitografických procesů, ale vzhledem k tomu, že čistá současná hodnota investice pro obě technologie je záporná, bylo by při požadavku vyššího diskontu nutné upravit prodejní cenu výrobků.



Graf 23: Závislost čisté současné hodnoty na velikosti diskontu

## Závěr

První část práce byla věnována seznámení s klasickou technologií výroby desek plošných spojů pomocí fotolitografických procesů a to z pohledu substrátů, jejich vlastností a jednotlivých kroků procesu výroby desek plošných spojů.

Druhá část práce se zabývala alternativní metodou výroby desek plošných spojů pomocí tlustovrstvých technologií. Seznamuje s pastami, které lze použít pro tvorbu motivu a jejich elektrickými vlastnostmi. Rovněž se věnuje jednotlivým technologiím nanášení pasty na substrát, procesu výpalu a vytvrzování past a diagnostiky natištěného motivu.

Třetí část práce se zabývá tvorbou a měřením vzorků tlustých vrstev, přičemž jsem se soustředil na vliv tvaru tlustovrstvé struktury na její vlastnosti. Vzorky tlustovrstvých struktur byly vytvořeny ze stříbrných a uhlíkových organických past pomocí ručního sítotisku. Vlivem použití ručního sítotiskového stroje byla ovlivněna kvalita vytvořených vzorků, což mohlo ovlivnit naměřené hodnoty. Z vlastností vrstev byly zkoumány závislosti odporu vrstvy a odporu na čtverec na rozměrech vrstvy. Naměřené hodnoty byly využity k ověření a potvrzení teoretického předpokladu vlivu délky a šířky vrstvy na její odpor. Jak se ukázalo, tak odpor na čtverec navzdory teoretickým předpokladům vykázal určitou závislost na rozměrech vrstvy. V případě závislosti odporu na čtverec na šířce vrstvy bylo zjištěno, že s výjimkou nejužších drah motivů a vzorků vytvořených z pasty CSP 3110D se velikost odporu s šířkou vrstvy téměř nemění. V případě nejužších drah se odlišnost hodnoty odporu na čtverec od ostatních drah s větší šířkou může dle mého názoru vysvětlit rozdílem skutečné a teoretické šířky a nehomogenitami vrstvy, které se nejvíce projeví právě v případě nejužších drah. Naměřené závislosti odporu na čtverec na délce dráhy byly ze všech naměřených závislostí nejméně průkazné, jelikož v přibližně polovině případů byla závislost odporu na čtverec na délce vrstvy klesající, ve třech případech se velikost odporu na čtverec s délkou dráhy neměnila a v jednom případě naopak byla závislost rostoucí. Dle mého názoru se zde projevuje skutečnost, že nanosená tlustá vrstva má nehomogenní strukturu, přičemž pokud v dané vrstvě převažují nehomogenity typu větší tloušťky vrstvy, dochází k poklesu odporu na čtverec s délkou vrstvy, jelikož s rostoucí délkou roste pravděpodobnost výskytu těchto nehomogenit. Naopak převažují-li nehomogenity, které způsobují zvětšení odporu vrstvy, jako je například otvor ve vrstvě nebo tenčí vrstva pasty, pak odpor na čtverec s délkou vrstvy roste, budeme-li uvažovat, že se s velikostí délky vrstvy pravděpodobnost výskytu nehomogenit zvyšuje. V některých případech se může účinek nehomogenit navzájem vyrušit a odpor na čtverec pak není závislý na délce vrstvy, což odpovídá teoretickému předpokladu.

Dále u části vzorků byla změřena tloušťka a šířka nanosené vrstvy pomocí měřiče profilu. Z naměřených hodnot vyplývá, že s výjimkou stříbrné pasty CSP 3110D byla šířka nanosené vrstvy větší v průměru o 0,03 mm než předpokládaná šířka dráhy nezávisle na šířce dráhy. Procentuální odchylka skutečné šířky od šířky předpokládané tak byla u nejužších drah největší, což, jak bylo zmíněno výše, se projevilo například ovlivněním velikosti odporu na čtverec. V případě pasty CSP 3110D byla průměrná šířka vrstvy menší, než předpokládaná. To podle mého názoru bylo způsobeno kombinací dvou důvodů. První důvod byl ten, že pasta měla ze všech použitých past nejvyšší obsah funkční složky a měla tedy nejvyšší viskozitu, díky čemuž nedošlo při nanášení k rozlité pasty. A druhým důvodem byla rozměrová kontrakce při vytvrzení vlivem odpaření organické složky. Rovněž díky nejvyšší viskozitě byla průměrná tloušťka vrstvy

v případě pasty CPS 3110D téměř dvojnásobná oproti zbývajícím pastám. Při měření tloušťky vrstev pomocí měřiče profilu bylo také zjištěno, že povrch uhlíkových past byl méně členitý, než v případě stříbrných past, což bylo pravděpodobně způsobeno vyšší viskozitou stříbrných past.

Poslední část této práce byla věnována stanovení nákladů na výrobu jednovrstvé desky plošných spojů pro obě technologie a jejich porovnání. V této části jsem uvedl jednotlivé nákladové položky u obou technologií. Dále jsem stanovil určité vyráběné množství výrobků shodné pro obě technologie výroby desek plošných spojů a pro toto vyráběné množství jsem provedl kalkulaci nákladů na jeden vyrobený kus. Dále jsem určil pomocí čisté současné hodnoty ideální prodejní cenu výrobků, při které by byly splněny požadavky na výnosnost investice, a provedl hodnocení obou investic do výroby jednovrstvých desek plošných spojů pomocí výpočtu doby splacení investice a analýzy bodu zvratu. V případě technologie tlustých vrstev jsem, vzhledem k poměrně širokému rozptylu ceny pasty způsobené cenami drahých kovů v ní obsažené, ještě navíc provedl analýzu závislosti čisté současné hodnoty investice na ceně nanášené vodivé pasty, přičemž jsem si potvrdil, že vzhledem k tomu, že vodivá pasta tvoří velkou část nákladů na výrobu desky plošných spojů, je hodnota čisté současné hodnoty na ceně pasty silně závislá. Nakonec jsem na základě výše zmíněných kritérií provedl porovnání obou investic.

Na závěr je však nutné konstatovat, že výrobky vyráběné pomocí technologie tlustých vrstev a fotolitografických procesů nelze plně navzájem zaměňovat, jelikož se od sebe v mnohých parametrech odlišují. Například motivy vytvářené pomocí anorganických past se vyznačují vyšší mechanickou i chemickou odolností a díky nutnosti použití anorganických substrátů s lepší tepelnou vodivostí jsou také schopné odolávat vyššímu výkonovému zatížení, avšak jak je patrné z kalkulace nákladů, výroba desek plošných spojů pomocí anorganických past pro tlusté vrstvy je několikanásobně dražší, než výroba DPS pomocí fotolitografických procesů. Tento výrazný cenový rozdíl tak předurčuje technologii tlustých vrstev využívající anorganické pasty pouze k speciálním účelům tam, kde nelze použít desky plošných spojů vyráběné fotolitografickými procesy a cenový rozdíl těchto technologií se tak stírá, což mohou být například právě výkonové aplikace, osvětlovací LED technika, realizace hybridních integrovaných obvodů a výroba senzorů. Alternativou k anorganickým pastám mohou být pasty organické, které díky nižší teplotě vytvrzení umožňují použití organických substrátů, což se příznivě projevuje v ceně konečného výrobku, ale v porovnání s anorganickými pastami vykazují horší elektrické vlastnosti. Výhodou organických past oproti fotolitografickým procesům může být jednodušší postup výroby vzhledem k nižšímu počtu výrobních operací, avšak vzhledem k horším elektrickým vlastnostem těchto past je lze použít v aplikacích s nižšími nároky na vlastnosti nanesené vrstvy.

## Seznam použité literatury

- [1] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 9788021432925;8021432926;.
- [2] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 9788001023921;8001023923;.
- [3] BUJABOKOVÁ, Magdaléna a Pavel TRNKA. *Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích*. Časopis Elektro. 2008. [online]. [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/progresivni-tlustovrstve-technologie-v-elektronickych-aplikacich--11693>
- [4] BESHAIJOVÁ PELIKÁNOVÁ, Ivana. *Tlusté vrstvy - tisk, vytvrzení, měření*. [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/tlustvrstvy.pdf>
- [5] SZENDIUCH, Ivan. *Tlusté vrstvy (Thick films)* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/41173783-Tluste-vrstvy-thick-films-2.html>
- [6] KOBLÍŽEK, Vilém. *Vrtání a kontrola desek plošných spojů* [online]. [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: [http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/A1B13VST-lab\\_soubory/Uloha\\_c.5.pdf](http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/A1B13VST-lab_soubory/Uloha_c.5.pdf)
- [7] SZENDIUCH, Ivan. *Mikroelektronické montážní technologie*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 1997. ISBN 8021409010;9788021409019;.
- [8] PEISAR, Miroslav. *Jak se dělá plošný spoj*. Časopis Elektro [online]. 2013, 2013(8-9), 76-78 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2013/08/Elektro\\_08\\_2013\\_output/web/Elektro\\_08\\_2013\\_opf\\_files/WebSearch/page0078.html](http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2013/08/Elektro_08_2013_output/web/Elektro_08_2013_opf_files/WebSearch/page0078.html)
- [9] *Vícevrstvé desky* [online] 2010, [cit. 2017-11-26]. Printed s.r.o. Dostupné z: <http://www.printed.cz/vicevrstve-desky>
- [10] SZENDIUCH, Ivan. *Materiály pro přednášky - tlusté vrstvy* [online], [cit. 2017-12-06]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a\\_tluste\\_vrstvy.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a_tluste_vrstvy.pdf)
- [11] ADÁMEK, Martin. *LABORATORNÍ CVIČENÍ – Teplotní koeficient odporu* [online]. [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: [www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/proj/2011/LN01\\_Lab4\\_TKR.doc](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/proj/2011/LN01_Lab4_TKR.doc)
- [12] ABEL, Martin. *Plošné spoje se SMD, návrh a konstrukce*. Pardubice: Platan, 2000. ISBN 80-902-7332-7.
- [13] KOBLÍŽEK, Vilém. *Dielektrické vlastnosti tuhých látek* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: [http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab\\_soubory/uloha\\_4.pdf](http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_4.pdf)
- [14] *Povrchové úpravy* [online]. [cit. 2017-12-16]. PragoBoard s.r.o. Dostupné z: <https://www.pragoboard.cz/node/37>

- [15] KOBLÍŽEK, Vilém. *Elektrická pevnost izolačních fólií* [online]. [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: [http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab\\_soubory/uloha\\_5.pdf](http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_5.pdf)
- [16] Photoimageable thick-film paste [online]. [cit. 2017-12-22]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/documents/prodlib/5989.pdf>
- [17] VLK, Miroslav. *Metody optického testování osazení desek plošných spojů* [online]. [cit. 2017-12-24]. Dostupné z: [https://theses.cz/id/2j0ij4/Bakalsk\\_prce\\_Miroslav\\_Vlk.pdf](https://theses.cz/id/2j0ij4/Bakalsk_prce_Miroslav_Vlk.pdf). Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Michal Šerý.
- [18] *IMT Technologies & Solutions s.r.o.* [online]. [cit. 2017-12-24]. Dostupné z: <http://www.imtts.cz/>
- [19] ABEL, Martin. Možnosti optické kontroly osazených desek plošných spojů. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. [cit. 2017-12-24]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:10750/moznosti-opticke-kontroly-osazenych-desek-plosnych-spoju>
- [20] MERGL, Lukáš. *Testování desek plošných spojů*. 2014. [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/14257/1/Bakalarska%20prace%20Mergl.pdf>. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita v Plzni. Vedoucí práce Tomáš Řeřicha.
- [21] VÍDEŇSKÝ, Ondřej. *Smáčivost povrchových úprav DPS a porovnání metod*. 2017. [online]. [cit. 2017-12-25]. Dostupné také z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/68274/xviden05\\_170837.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/68274/xviden05_170837.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Jiří Starý.
- [22] Povrchové úpravy. [online]. [cit. 2017-12-28]. Semach – plošné spoje Dostupné z: <http://www.semach.cz/povrchy3.html>
- [23] EICHLER, Petr. *Vliv okolního prostředí na tlustovrstvé struktury*. Praha, 2016, [online]. [cit.2018-02-25]. 77 s. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64760/F3-DP-2016-Eichler-Petr-Vliv%20okolniho%20prostredi%20na%20tlustovrstve%20struktury.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ivana Beshajová Pelikánová.
- [24] GUPTA, Tapan. *Handbook of thick- and thin-film hybrid microelectronics*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2003. ISBN 04-712-7229-9.
- [25] ŠANDERA, Josef a Jiří STARÝ. *Mikroelektronické praktikum*. [online]. [cit. 2018-02-28] Dostupné také z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~sander/BMEP/skrBMEPsan2.pdf>

- [26] HROMADKA, Karel. *Substráty pro výkonové aplikace v elektrotechnice*. Plzeň, 2015. [online]. [cit. 2018-02-28] Dostupné také z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/23041>. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Aleš Hamáček.
- [27] Technologie Thick Printed Copper. ELCERAM a.s.: Keramika pro elektrotechniku [online]. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://www.elceram.cz/cs/technologie-technologie-thick-printed-copper.html>
- [28] CHANG SUNG CORPORATION. Conductive pastes: Materials for a high-tech revolution [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: [http://changsung.com/\\_new/wp-content/themes/changsung/images/product\\_PDF/conductive\\_pastes.pdf](http://changsung.com/_new/wp-content/themes/changsung/images/product_PDF/conductive_pastes.pdf)
- [29] JOHAN, Jan. ELCERAM a.s. Nové trendy v technologii tlustých vrstev (Thick Film Technology) a hybridních integrovaných obvodech. Prezentace. 2015.[cit. 2018-05-03]
- [30] Panelizace desky očima návrháře. DPS elektronika od a do z [online]. 3/2014 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyvoj/id:2435/panelizace-desky-ocima-navrhare>

## **Seznam příloh**

Příloha č. 1: Změřené a vypočtené hodnoty CSP 3110D

Příloha č. 2: Změřené a vypočtené hodnoty Paron 910

Příloha č. 3: Změřené a vypočtené hodnoty CSP 3225

Příloha č. 4: Změřené a vypočtené hodnoty Paron 920

Příloha č. 5: Porovnání fotolitografie a tlustých vrstev z pohledu ekonomického